

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID AUTO-AJUSTÁVEL BASEADO  
EM RECONHECIMENTO DE FORMAS DE ONDAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

---

ANNIBAL HOESCHL ABREU

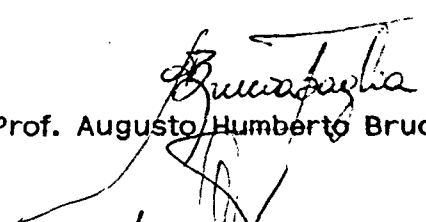
FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1992

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID AUTO-AJUSTÁVEL BASEADO  
EM RECONHECIMENTO DE FORMAS DE ONDAS**

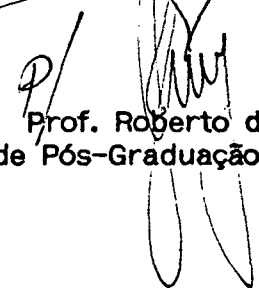
**ANNIBAL HOESCHL ABREU**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SISTEMAS DE  
CONTROLE E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO**



Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr Ing.  
Orientador

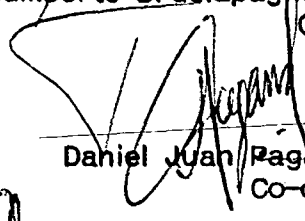


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph. D.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**BANCA EXAMINADORA**




Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr Ing.  
Orientador



Daniel Juan Pagano, M.Sc.  
Co-orientador



José Eduardo Ribeiro Cury, Dr D'Etat



Luís Francisco Gerbase, M.Sc.



## AGRADECIMENTOS

Ao caro amigo Daniel Juan Pagano pelo apoio, constante estímulo, orientação e amizade.

Ao prof. Augusto H. Bruciapaglia pela orientação.

Ao prof. Ariovaldo Bolzan que gentilmente permitiu a utilização de seu laboratório e colaborou com este trabalho.

Aos demais colegas pela amizade e pelo convívio agradável durante todo o trabalho.

Em especial a meus pais pelo apoio, estímulo, compreensão e carinho permanente durante a realização deste trabalho.

## Sumário

<b>Resumo .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>viii</b>
<b>Capítulo I – Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo II – Descrição do controlador PID-AA</b>	
2.1. Introdução.....	7
2.2. Universo de processos considerado.....	7
2.3. O Sistema de Produção Proposicional (SPP).....	8
2.4. Ajuste inicial do PID-AA.....	11
2.5. Ajuste dos parâmetros do PID-AA em malha fechada.....	13
2.6. Conclusão.....	16
<b>Capítulo III – Implementação do controlador PID-AA</b>	
3.1. Introdução.....	17
3.2. Especificação funcional do controlador.....	17
3.2.1. Modos de funcionamento.....	18
3.2.2. Interface de entrada e saída.....	19
3.2.3. Interface homem/máquina.....	20
3.2.4. Supervisor.....	21
3.2.5. Gerenciamento de tarefas.....	21
3.3. Arquitetura do sistema desenvolvido.....	22
3.3.1. Módulo do algoritmo do PID.....	24
3.3.2. Módulo Monitor.....	25
3.3.2.1. Módulo ZNM .....	25
3.3.2.2. Planejamento de Ganho (PGA) .....	26
3.3.3. Módulo Processador de Inf. em Tempo Real(PITR).....	27
3.3.3.1. Pré-processamento do sinal .....	28
3.3.3.2. Reconhecimento de Malha Aberta (RMA) .....	29
3.3.3.3. Reconhecimento de malha fechada (RMF) .....	30

3.3.4. Módulo do sistema especialista.....	31
3.3.5. Módulo de Transferência.....	35
3.3.5.1. Mudança de parâmetros do controlador .....	35
3.3.5.2. Mudança suave entre modos .....	35
3.3.5.3. Atualização da memória do módulo PGA .....	36
3.3.6. Módulo do supervisor.....	36
3.3.7. Módulo Gerenciador.....	38
3.3.8. Módulo de interface homem/máquina.....	39
3.4 Descrição do protótipo implementado.....	40
3.5. Considerações para implementação de um protótipo de controlador PID-AA industrial.....	41
3.5.1. Considerações sobre o "software".....	41
3.5.2. Considerações sobre o "hardware".....	42
3.5.2.1. Controlador "single-loop" .....	42
3.5.2.2. Sistema multi-malhas .....	45
3.5.2.3. Sensores Inteligentes .....	47
3.6. Conclusão.....	47
<b>Capítulo IV – O método de regressão por partes</b>	
4.1. Introdução.....	49
4.2. Técnicas de estimação .....	49
4.3. Descrição do método desenvolvido.....	51
4.4. Equacionamento matemático do método desenvolvido.....	52
4.5. Análise da aplicação do método desenvolvido.....	54
4.5.1. Efeito do número de pontos de um intervalo (M).....	54
4.5.2. Efeito da amplitude do ruído.....	56
4.5.3. Efeito da frequência de amostragem.....	58
4.6. Determinação do número de pontos de um intervalo.....	60
4.7. Estratégia para determinação automática do número de pontos de cada intervalo (M).....	62
4.8. Conclusões.....	63

## Capítulo V – Resultados do funcionamento do PID-AA

5.1. Introdução.....	65
5.2. Resultados da utilização das rot. de reconhecimento.....	65
5.2.1. Reconhecimento de malha aberta.....	65
5.2.2. Reconhecimento de malha fechada.....	67
5.3. Resultados da utilização do pré-processamento.....	69
5.4. Resultados do funcionamento do PID-AA.....	71
5.5. Comparação entre o PID-AA e um PID clássico.....	75
5.6. Resultados da atuação do supervisor frente .....	78
5.7. Conclusões.....	80

## Capítulo VI – Comparação qualitativa entre o PID-AA e outra abordagem adaptativa

6.1. Introdução.....	82
6.2. O controlador GPC.....	82
6.3. Processos utilizados no estudo comparativo.....	85
6.3.1. Trocador de calor.....	85
6.3.2. Sistema de tanques acoplados.....	86
6.4. Resultados obtidos no controle das plantas piloto.....	87
6.4.1. Análise de resultados do trocador de calor.....	87
6.4.2. Análise de resultados do sistema de tanques.....	91
6.5. Conclusões.....	96

## Capítulo VII – Conclusões e Perspectivas ..... 99

Referências Bibliográficas .....	102
Apêndice A .....	106
Apêndice B .....	108
Apêndice C .....	109
Apêndice D .....	110
Apêndice E .....	112

## RESUMO

Apresenta-se neste trabalho a implementação de um controlador PID Auto-Ajustável, baseado num sistema especialista de regras de produção. Este controlador realiza o ajuste dos seus parâmetros a partir do reconhecimento das formas de onda do sistema sob controle, em resposta a sinais de referência e perturbação.

Uma arquitetura específica é proposta e implementada, a fim de adequar o controlador ao ambiente real (industrial), considerando-se as necessidades de comunicação com o processo, com o operador e as decorrentes dos próprios mecanismos de adaptação. A presença de ruído condicionou o desenvolvimento e implementação de um método de suavização dos sinais lidos da planta, para efeitos de reconhecimento das formas de onda.

Ensaio experimentais, com processos reais sob diferentes condições de operação, permitiram analisar o desempenho do controlador proposto, assim como compará-lo com um controlador PID a parâmetros fixos e outra abordagem adaptativa.

Finalmente apresenta-se uma análise crítica do trabalho desenvolvido e sugestões para novos trabalhos.

---



## ABSTRACT

This work presents the implementation of a self-tuning PID controller based on an expert system of production rules. This controller makes the adjustment of its own parameters through wave pattern recognition of the controlled system, according to reference and disturbance signals.

A specific architecture is proposed and implemented in order to obtain an adequate functioning of this controller in industrial environment, considering the communication requirements with the process, with the plant operator and those requirements from adaptive mechanisms. The presence of noise impose the development and implementation of a smoothing signal method to the collected plant signals in wave patterns recognition.

Experimental tests with real processes under different operational conditions permitted the analysis of the performance of the proposed controller as well as comparisons with a fixed parameter controller and another adaptive approach.

Finally a critical analysis of the work is presented and suggestions for further research are proposed.

---

# CAPÍTULO I

## Introdução

Nos últimos anos a disputa por novos mercados criou a necessidade de modernização das plantas industriais. Para aumentar sua competitividade, as indústrias tem buscado melhorar a qualidade e diminuir os custos dos produtos fabricados. Desta maneira, técnicas mais modernas de controle, que utilizam sistemas computacionais, tem sido aplicadas em diversas plantas industriais. [Versteeg 86, Hang 91]

No controle de plantas industriais muitas vezes os processos não são bem entendidos, apresentam importantes não linearidades, grandes tempos de atraso de transporte e parâmetros variantes no tempo. Problemas deste tipo são, tradicionalmente e inadequadamente, atacados com controladores a parâmetros fixos (ex. clássicos controladores PID), sendo que existem casos onde o controle da planta é realizado manualmente (malha aberta) por operadores de planta. Outro problema de igual importância aos já citados é o grande número de processos com baixo desempenho por falta do ajuste correto dos parâmetros do controlador, o que por vezes necessita de grandes tempos de "start-up" e pessoal qualificado.

Estes problemas podem ser abordados separando-os em dois grupos básicos: um trata da otimização do ajuste dos parâmetros iniciais do controlador com conseqüente redução do tempo de "start-up" e o outro trata da melhoria de desempenho da planta quando em operação frente a mudanças em sua dinâmica ou nos parâmetros do controlador.

Controladores que ajustam automaticamente seus parâmetros para acompanhar mudanças no processo ou no meio ambiente utilizam as técnicas do Controle Adaptativo. Na verdade até o momento não há uma definição precisa e formal de controle adaptativo[Åström 84]. Intuitivamente um controlador adaptativo é aquele que pode mudar suas características em resposta a mudanças na dinâmica do processo e a distúrbios.

O controle adaptativo é um tipo de realimentação não linear. Os estados do processo são separados em duas categorias que mudam com taxas diferentes. Os estados do processo com variações lentas são chamados de parâmetros do processo e os estados com variações mais rápidas são as variáveis do processo. Portanto existem duas escalas de tempo : uma escala rápida (variáveis) que relaciona-se com a realimentação clássica e outra lenta (parâmetros) relacionada

relaciona-se com a realimentação clássica e outra lenta (parâmetros) relacionada com a realimentação adaptativa. O diagrama da figura 1.1 ilustra o conceito apresentado [Åström 84]. Nesta figura a barra dupla indica os parâmetros do processo e a barra simples as variáveis do processo.

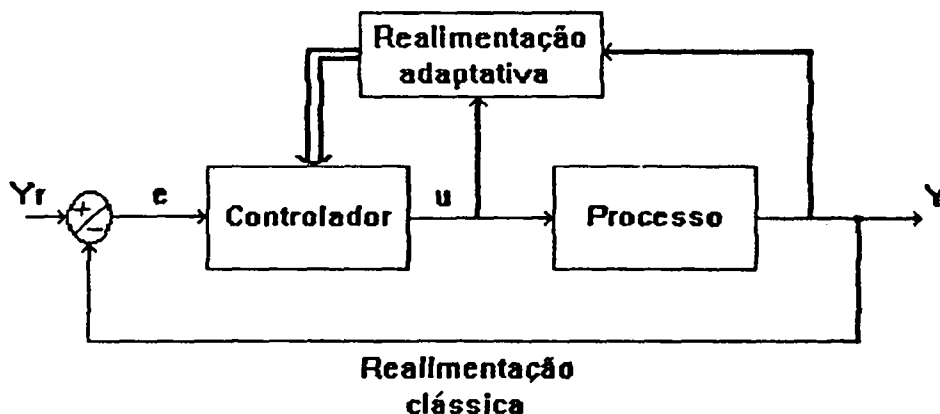


Fig. 1.1 - Conceito de controle adaptativo

Dentre as técnicas do controle adaptativo encontram-se os controladores do tipo auto-ajustáveis ("self-tuning"). As primeiras idéias sobre estes controladores surgiram na segunda metade da década de 1950 em artigos de autoria de Kalman[Kalman 58]. Estes controladores tiveram seu desenvolvimento ligado a processos de controle industrial e começaram a ganhar importância a partir de 1970, com o aperfeiçoamento das técnicas de identificação, projeto de controladores e o avanço dos circuitos digitais [Åström 73,Clarke 79].

Os controladores auto-ajustáveis possuem a capacidade de ajustar seus parâmetros, sem a intervenção do operador, a fim de compensar mudanças na dinâmica da planta. Convém aqui distinguir duas expressões, que quando traduzidas, podem provocar mal-entendidos: "self-tuning"\* e "auto-tuning" \*\* [Åström 84]. A primeira refere-se ao tipo de controlador aqui discutido. A

\*A expressão "self-tuning" pode ser traduzida como AUTO-AJUSTAVEL. Esta expressão aplica-se a todo controlador capaz de funcionar totalmente independente de intervenção externa.

\*\*A expressão "auto-tuning" pode ser traduzida como AJUSTE AUTOMATICO, sendo uma abreviação de "automatic tuning". Esta expressão aplica-se a todo controlador em que o ajuste inicial dos parâmetros (antes do controlador ser colocado em funcionamento) é substituído por uma sequência automática de procedimentos.

segunda refere-se aos controladores que usam métodos de inicialização que possibilitam a determinação dos parâmetros ótimos para operação da planta. Dentre estes métodos o mais difundido é o de Ziegler e Nichols [Ziegler 42, Ziegler 43].

Os métodos de inicialização procuram evitar a necessidade de conhecimento "a priori" da planta e devido a sua simplicidade permitiram o aparecimento de vários controladores de processos no meio industrial [Morris 87]. Estes controladores (com ajuste automático="auto-tuning") automatizam o trabalho do engenheiro de processos diminuindo os tempos de "start-up" e fornecem parâmetros de ajuste ótimos para operação do controlador.

Considerando o grande número de controladores operando com ajustes não adequados, a diminuição dos tempos de "start-up" e a vantagem de auxiliarem os especialistas no ajuste de malhas complexas de controle, a contribuição destes controladores na otimização do desempenho da planta é significativa. A automatização do trabalho de ajuste possibilita também que o engenheiro de processos dedique seu tempo para resolver outros tipos de problemas.

A idéia básica dos controladores auto-ajustáveis("self-tuning"), por outro lado, é tornar automáticas as etapas envolvidas num projeto de sistema de controle [Wellstead 86]: identificação, projeto do controlador e implementação. Durante a identificação o engenheiro de processos estuda a planta a ser controlada e desenvolve um modelo do sistema. Uma vez definidas a estrutura e as condições impostas pelo modelo, assim como as especificações de desempenho, é projetada uma estratégia de controle. Finalmente o controlador é implementado e testado sobre o sistema real.

Os controladores auto-ajustáveis são implementados em sistemas digitais e a cada período de amostragem executam a seqüência : identificação, projeto e implementação. Deste modo partindo-se de uma dada condição inicial, o controlador leva o sistema a auto-ajustar-se.

A utilização de sistemas microprocessados na implementação destes controladores foi portanto decisiva para o desenvolvimento desta tecnologia. Os primeiros experimentos foram muito dificultados por problemas de "hardware", pois as implementações eram realizadas utilizando-se circuitos analógicos e impediam uma relação custo/benefício favorável.

Os controladores auto-ajustáveis podem ser desenvolvidos a partir de uma formulação matemática ou de forma heurística. Os controladores baseados no

equacionamento matemático (Fig. 1.2) utilizam métodos de identificação para estimar os parâmetros do modelo da planta. Dentre estes métodos pode-se citar: mínimos quadrados, mínimos quadrados generalizado, máxima verossimilhança, mínima variância, método dos gradientes, variáveis instrumentais, correlação e aproximação estocástica [Sinha 83]. Após estimados os parâmetros da planta, aplica-se uma técnica de projeto específica como alocação de polos ou minimização de uma função custo.

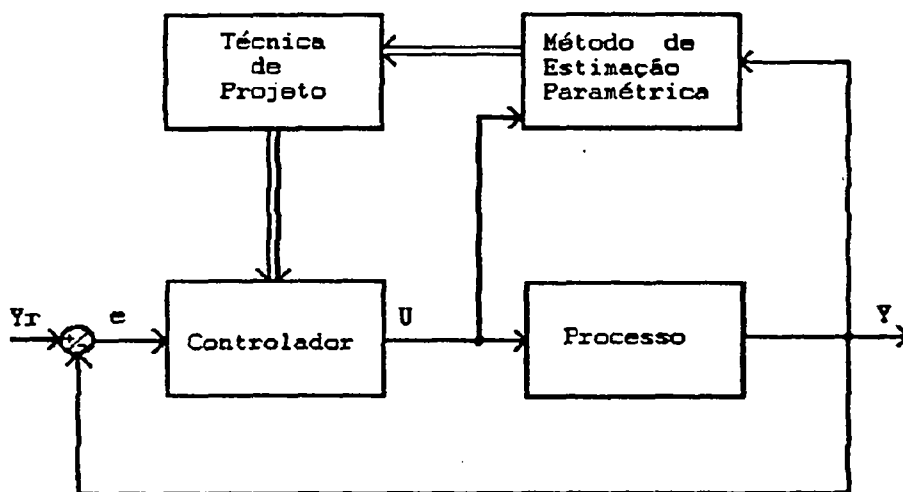


Fig. 1.2 - Abordagem matemática

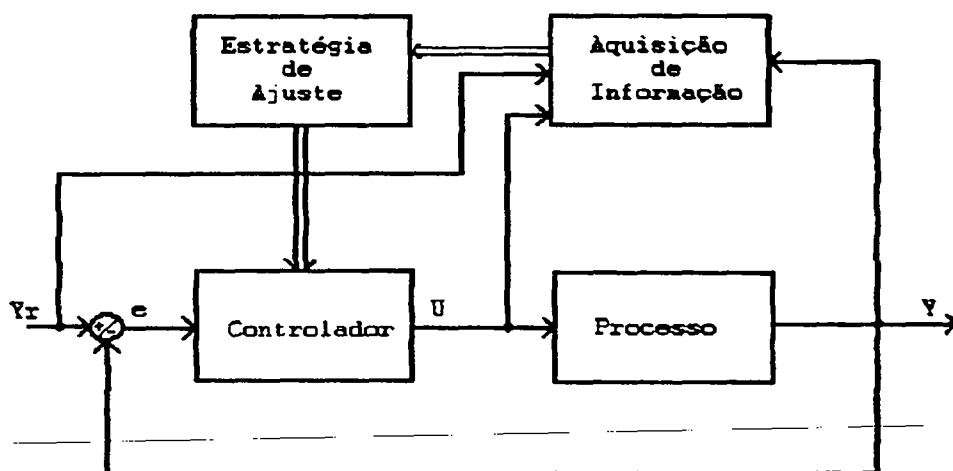


Fig. 1.3 - Abordagem heurística

Já os controladores baseados numa abordagem heurística (Fig. 1.3) utilizam informações sobre a planta para definir o tipo de ajuste a ser aplicado ao controlador. Estes controladores podem utilizar técnicas de inteligência artificial, redes neurais ou técnicas baseadas em conjuntos difusos.

As duas abordagens discutidas, matemática e heurística, procuram substituir o engenheiro de processos, automatizando seu trabalho. Esta classificação baseia-se no fato do engenheiro de processos ter duas maneiras para desempenhar seu trabalho : equacionar o problema matematicamente ou usar sua experiência no ajuste do controlador.

O presente trabalho faz parte do desenvolvimento do controlador PID-AA do Laboratório de Microinformática e Controle da UFSC e teve como objetivo principal implementar um protótipo do controlador desenvolvido.

O controlador PID-AA baseia-se na lei de controle clássica PID (Proporcional+Integral+Derivativa) e possui mecanismos de adaptação que lhe acrescentam características próprias de um controlador auto-ajustável (PID-AutoAjustável).

O controlador foi desenvolvido sob uma abordagem heurística utilizando-se um sistema de regras de produção. Este controlador realiza o ajuste dos seus parâmetros a partir do reconhecimento das formas de onda de resposta do sistema sob controle. A resposta de malha fechada do sistema é classificada de acordo com um dentre 10 grupos padrões possíveis (apêndice A). A cada grupo padrão está associado a um conjunto de regras de produção do tipo condição-ação que define uma estratégia de ajuste particular.

A escolha do algoritmo de controle tipo PID justifica-se por sua ampla e consagrada utilização no meio industrial, que demonstra sua boa performance sobre um grande número de processos. Como qualquer tecnologia já consagrada pelo uso, torna-se interessante a introdução de técnicas mais modernas no algoritmo PID, a fim de aumentar seu universo de aplicação e melhorar seu desempenho em processos com dinâmica variável no tempo.

A necessidade de facilitar o entendimento pelos especialistas de planta da maneira como são ajustados os parâmetros do controlador, uma vez que o controlador PID é o de uso mais difundido na indústria, explica porque a maioria dos controladores auto-ajustáveis baseiam-se neste tipo de algoritmo de controle.

Visando o funcionamento adequado do controlador em ambiente real (industrial), uma arquitetura específica é proposta e implementada, levando em conta as necessidades de comunicação com o processo, com o operador e as decorrentes dos próprios mecanismos de adaptação.

Ensaio experimentais, com processos reais sob diferentes condições de operação, permitiram analisar o desempenho do controlador proposto, assim como compará-lo com a abordagem a parâmetros fixos e outra abordagem adaptativa.

No capítulo 2 apresentar-se-á o PID auto-ajustável desenvolvido. Este foi desenvolvido sob uma abordagem heurística, mas sua validação foi obtida através de extensivos testes sobre diferentes tipos de sistemas, num ambiente de simulação especialmente projetado para este fim. O desenvolvimento deste controlador foi objeto de duas dissertações de mestrado (uma delas em desenvolvimento) deste laboratório. [Pagano 89, Caetano 92]

No capítulo 3 apresentar-se-á como foi implementado o algoritmo do PID-AA visando a operação num ambiente industrial real. Aspectos relacionados com a implementação do controlador, como a descrição da arquitetura do software e de hardware necessários, são apresentados neste capítulo. Problemas referentes a segurança de operação do controlador em ambiente industrial e a interface com o operador são também descritos.

O reconhecimento das formas de onda da resposta do sistema é dificultado pela ocorrência de ruído na aquisição do sinal. Assim, no capítulo 4, apresentar-se-á o método de ajuste de curvas desenvolvido que extrai a forma de onda original do sistema, a partir do sinal com ruído recebido da planta.

No capítulo 5 os resultados do desempenho do controlador no controle de alguns processos de laboratório e durante a ocorrência de situações de alarme (oscilações e instabilidade) são apresentados. O controlador desenvolvido é comparado com um controlador PID clássico.

No capítulo 6 realizar-se-á um estudo comparativo numa unidade experimental de laboratório entre o controlador implementado e outra abordagem adaptativa não heurística. O estudo baseia-se nos resultados obtidos no controle da planta piloto e é fundamentalmente qualitativo. Entretanto o estudo realizado fornece resultados que possibilitam uma crítica sobre as diferentes abordagens utilizadas.

No capítulo 7 apresentar-se-á a conclusão do trabalho e perspectivas de trabalhos para melhoria do controlador implementado.

# CAPÍTULO I I

## Descrição do controlador PID-AA

### 2.1. Introdução

No capítulo anterior procurou-se justificar o desenvolvimento deste trabalho e localiza-lo dentro da teoria de Controle Adaptativo. O problema de inicialização e a necessidade do ajuste contínuo durante a operação dos controladores foram discutidos.

Neste capítulo serão apresentados os trabalhos anteriores desenvolvidos sobre o sistema especialista, o ajuste inicial de malha aberta e o ajuste do controlador em malha fechada.

Salienta-se que o presente trabalho é a continuação dos desenvolvimentos anteriores, consistindo na implementação e adequação dos resultados obtidos visando a aplicação em ambiente industrial deste controlador. Desta maneira, maiores informações devem ser obtidas nos trabalhos originais anteriores [Pagano 89, Paladino 91] e paralelos [Caetano 92] em que se fundamentou este trabalho.

O entendimento correto do controlador desenvolvido abrange o conhecimento de três partes distintas no seu funcionamento: sistema especialista utilizado, mecanismo de ajuste automático e mecanismo de auto-ajuste. Além disto é indispensável conhecer os tipos de processos para os quais pode-se utilizar este controlador. Desta maneira cada um destes aspectos serão discutidos neste capítulo.

### 2.2. Universo de processos considerado

O controlador PID-AA foi desenvolvido visando obter um controlador robusto e de propósito geral para aplicações industriais, mais especificamente para o controle de processos. No meio industrial, a expressão "controle de processos" refere-se genericamente as atividades de controle relacionadas a processos do tipo químico, térmico, etc... Não se enquadram neste contexto, por exemplo, o controle de motores ou manipuladores. Na verdade não há uma definição precisa para esta expressão, mas costuma-se aplicá-la àqueles processos que possuem constantes de tempo da ordem de minutos ou horas.



O controlador desenvolvido tem como principal característica adaptar-se a mudanças na dinâmica da planta. Contudo há uma limitação na maneira como estas podem ocorrer. As aplicações do controlador limitam-se a processos em que as mudanças ocorrem em intervalos de tempo limitados e bem definidos. Processos com alterações contínuas de dinâmica ou que apresentam uma frequência elevada de mudanças não podem ser controlados adequadamente pelo PID-AA. Processos deste tipo, como por exemplo fermentadores ou reatores em batelada, devem utilizar controladores com outras características e projetados para este fim.

Os processos industriais de acordo com suas características podem ser classificados em : sobre-amortecidos, sub-amortecidos, de fase não-mínima e integrativos. Esta classificação baseia-se na curva de reação do processo, ou seja, na resposta em malha aberta a um sinal do tipo degrau aplicado ao processo. Os processos sobre-amortecidos apresentam uma curva de reação em forma de "S", caracterizando-se por uma resposta monotonicamente crescente. (Fig 2.1)

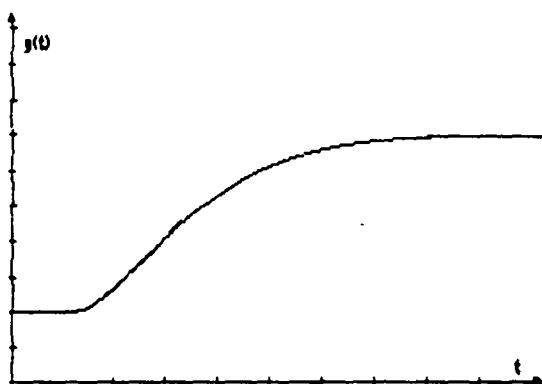


Fig. 2.1 - Curva de reação de processo sobre-amortecido

A maior parte dos processos industriais são do tipo sobre-amortecido, possuem grandes constantes de tempo e as mudanças em sua dinâmica ocorrem em intervalos de tempo que são maiores que algumas vezes a constante de tempo do processo. O controlador PID-AA aplica-se a este tipo de processos. Desta maneira, o controlador desenvolvido aplica-se a um grande número de processos industriais.

### 2.3. O Sistema de Produção Proposicional (SPP)

Neste trabalho um tipo particular de sistema especialista foi utilizado: os chamados Sistemas de Produção [Brownston 86]. Sistema de Produção é um paradigma de programação que permite representar o conhecimento na forma de

regras do tipo condição-ação(IF-THEN), sendo por isto também denominado de sistemas baseados em regras. A primeira porção da regra estabelece uma série de padrões (condições) que especificam os fatos (dados) que determinam se a regra é aplicável. A segunda porção da regra é um conjunto de ações que são executadas quando a regra é aplicada. O conjunto das condições e ações a serem executadas, se as condições são verificadas, é construído como uma rede de regras chamada de Sistema de Produção.

Três elementos básicos (Fig.2.2) constituem um sistema de produção: memória de trabalho(MT), memória de regras(MR) e máquina de inferência(MI). A memória de trabalho é uma lista de fatos que contém dados que representam o estado corrente do sistema. A memória de regras representa os conhecimentos de um especialista arranjados segundo regras do tipo "se ... então ...". Finalmente, a máquina de inferência determina para cada estado corrente do sistema as regras que podem ser aplicadas e em seguida, segundo uma estratégia, executa as regras selecionadas.

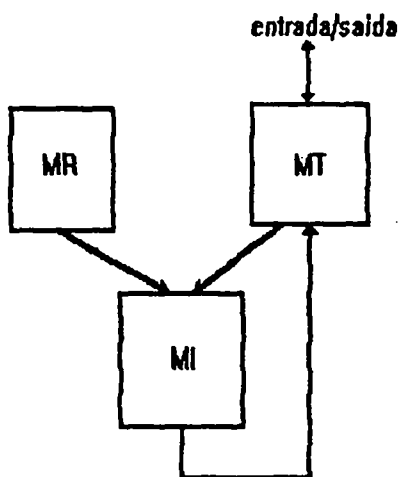


Fig 2.2 - Arquitetura básica de um Sistema de Produção(SP)

A máquina de inferência é um programa que explora a base de conhecimento (memória de regras) de acordo com o estado corrente do sistema(dados da memória de trabalho). Isto é realizado ciclicamente e durante cada ciclo três etapas são realizadas : geração de conflitos ("match"), resolução de conflitos("select") e execução("execute"). A primeira etapa consiste em determinar quais as regras podem ser aplicadas através da confrontação dos dados contidos na memória de trabalho com as regras da base de conhecimento (memória de regras). Na segunda etapa determina-se quais as regras e como serão

executadas conforme diferentes estratégias como: executar a primeira regra encontrada, as mais simples, as menos empregadas, que utilizam a maior quantidade de dados, etc... Na terceira etapa as regras escolhidas são executadas e a memória de trabalho é atualizada.

Um sistema de produção proposicional (SPP) foi desenvolvido, a fim de compatibilizar as aplicações de tempo real (PID-AA) com os sistemas especialistas. Este sistema foi objeto de uma dissertação de mestrado [Paladino 91]. O sistema baseia-se na lógica proposicional, por esta razão é chamado de sistema de produção proposicional (ou de ordem 0).

O sistema foi implementado como um gerador de programas, sendo melhor entendido como um pré-compilador. A sintaxe da linguagem SPP é baseada nas estruturas da linguagem LISP. Isto justifica-se pelo fato desta linguagem ser tradicionalmente utilizada em inteligência artificial. Além disto esta escolha possibilita a implementação de um ambiente de desenvolvimento em LISP para o SPP. Portanto o SPP funciona como um pré-compilador que traduz a linguagem em forma de regras, segundo a sintaxe do SPP, para um código fonte na linguagem C. Desta maneira procura-se melhorar o tempo de execução e facilitar a interligação do sistema especialista com outras tarefas mais fáceis de implementar numa linguagem procedural como C.

O algoritmo de compilação do conhecimento do SPP tenta realizar a maior quantidade possível de tarefas durante a fase de geração do sistema especialista em linguagem C. Se para todas as situações possíveis de acontecer todas as regras correspondentes do sistema especialista fossem disparadas, obteríamos uma árvore de possibilidades que representaria o funcionamento do sistema para todas as situações.

A determinação em tempo de execução dos ramos gerados em cada ciclo da máquina de inferência é geralmente um processo custoso. Assim o algoritmo desenvolvido procura a partir de uma pré-compilação das regras e das informações disponíveis gerar todos os ramos possíveis, deixando para o tempo de execução apenas os ramos que necessitam de informações adicionais. Portanto, durante o tempo de execução, a máquina de inferência continua executando sua função. Neste algoritmo optou-se por otimizar o tempo de execução, embora isto provoque o inconveniente de gerar grande quantidade de código fonte na linguagem C. Desta maneira dependendo do número de regras contidas no sistema especialista o tamanho do código gerado pode ser grande. Apesar deste

inconveniente o sistema SPP desenvolvido mostrou-se, na prática, muito eficiente e adequado para os objetivos para os quais foi projetado.

#### 2.4. Ajuste inicial do PID-AA

Os controladores auto-ajustáveis são projetados com a finalidade de reagirem a mudanças na dinâmica da planta quando em operação, de modo a obter uma performance ótima. Contudo, antes que a planta seja colocada em operação, resta ainda o problema de inicialização de seu funcionamento ("start-up"). Isto representa uma importante etapa na implementação de processos industriais, uma vez que muitos destes possuem condições críticas para início de funcionamento, o que pode resultar em custos operacionais elevados. Como exemplo, pode-se citar a inicialização de um alto forno industrial ou uma torre de destilação, onde a temperatura deve ser lentamente elevada, de modo a evitar problemas nas estruturas dos equipamentos. Nestes processos temperaturas muito altas são atingidas e o valor do sobressinal deve ser portanto rigorosamente controlado. Além disto, instabilidade ou oscilações na temperatura são inadmissíveis.

A inicialização de uma planta industrial consiste em levá-la até seu ponto de operação. Normalmente uma planta é constituída por diversas malhas de controle e existe a necessidade de ajustar os parâmetros iniciais dos controladores presentes. Portanto, após a inicialização de operação da planta, segue-se a inicialização de cada um dos controladores.

No caso particular do controlador desenvolvido, a etapa de inicialização dos controladores torna-se bastante simplificada. Esta etapa corresponde ao problema do conhecimento "a priori" dos parâmetros do PID, que além de fornecerem uma performance ótima, garantam o funcionamento seguro do sistema, ou seja, não levem o processo à instabilidade ou a outra condição indesejável.

Na realização do PID-AA objetivou-se o desenvolvimento de um controlador robusto e de propósito geral. Contudo algum conhecimento do processo a ser controlado ainda se faz necessário. Assim o PID-AA realiza o reconhecimento da resposta de malha aberta do sistema, através da curva de reação, de modo a obter informações sobre o processo que possibilitem a determinação de um primeiro conjunto de parâmetros para o PID, servindo como ponto de partida para outros ajustes (mecanismo de ajuste automático do controlador).

As informações obtidas da curva de reação do processo baseiam-se nos trabalhos de Ziegler e Nichols [Ziegler 42]. Nestes trabalhos a relação entre o tempo de atraso de transporte efetivo ( $L$ ) e a constante de tempo equivalente ( $\tau$ ), medidos sobre a curva de reação, são usados como índice de controlabilidade do processo [Pagano 89].

A curva de reação do processo é obtida de forma automática aplicando-se ao sistema em malha aberta um degrau de amplitude conhecida. Os seguintes parâmetros são retirados desta curva : tempo de atraso de transporte efetivo ( $L$ ), constante de tempo equivalente ( $\tau$ ), ganho estático do processo ( $K_p$ ) e ponto de inflexão ( $P_{inf}$ ) (Fig 2.3).

O processo é caracterizado pela relação  $L/\tau$  e pelo ponto de inflexão. A relação  $L/\tau$  fornece uma informação sobre a característica dominante da planta (atraso ou constante de tempo), enquanto o ponto de inflexão possibilita uma estimativa da ordem do processo. Estas informações são usadas na otimização da fase do controlador [Shinskey 86].

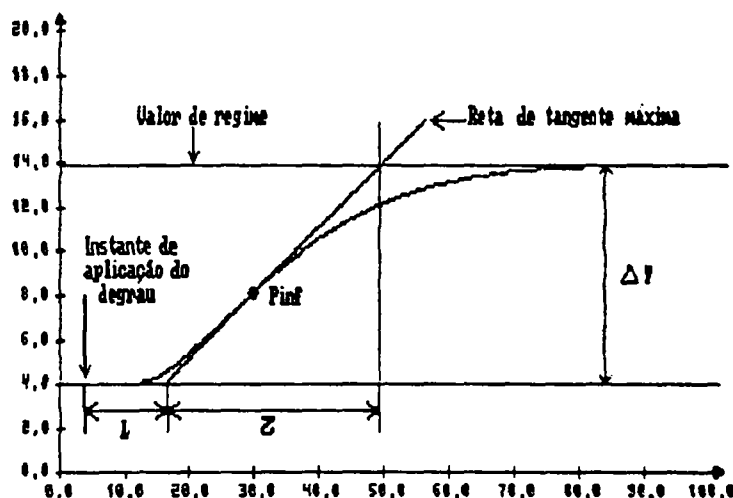


Fig.2.3 – Parâmetros de malha aberta

Os parâmetros iniciais do controlador PID-AA são calculados a partir das informações de malha aberta utilizando o método de Ziegler-Nichols Modificado (ZNM) [Pagano 89]. O método original de Ziegler e Nichols utiliza as seguintes equações, que valem para o intervalo  $0.1 < L/\tau < 1.0$ :

$$K_{CZN} = 1.2 \quad \tau / (L * K_p)$$

$$T_{iZN} = 2 L$$

$$T_{dZN} = 0.5 L$$

A modificação do método acima consiste em determinar valores alfa, beta e gama, funções da relação  $L/\tau$ , do ponto de inflexão ( $P_{inf}$ ) e das especificações de controle definidas (Apêndice B). Neste trabalho as especificações de controle estão definidas por sobrepasso máximo de 10% e subpasso máximo de 5%. Desta forma as equações que fornecem os parâmetros iniciais do PID são :

$$K_c = \text{alfa}(L/\tau, P_{inf}) * K_{cN}$$

$$T_i = \text{beta}(L/\tau, P_{inf}) * T_{iN}$$

$$T_d = \text{gama}(L/\tau, P_{inf}) * T_{dN}$$

## 2.5. Ajuste dos parâmetros do PID-AA em malha fechada

A metodologia de ajuste dos parâmetros do PID-AA baseia-se nos estudos realizados por Bristol [Bristol 77, Shinskey 86, Pagano 89]. Bristol observou não ser uma informação crítica o conhecimento matemático do processo para estabelecer um bom desempenho da malha de controle e que a resposta de malha fechada contém informações suficientes para ajustar o PID. Desta maneira, o reconhecimento de padrões de respostas do sistema no tempo permitem que se desenvolva um sistema de regras de produção de modo a ajustar os parâmetros do PID.

O mecanismo de auto-ajuste desenvolvido utiliza critérios próprios de um operador de planta e conceitos da teoria de controle, não necessitando do modelo matemático do processo. O controlador monitora continuamente a variável controlada na espera de transitórios (mudanças de referência ou perturbações de carga) sobre a planta. Na ocorrência de uma variação deste tipo o reconhecimento e classificação da resposta da planta são automaticamente executados e caso seja necessário, novos parâmetros para o PID são calculados. O sistema de regras de produção foi desenvolvido de modo que a resposta do sistema tenda à especificação imposta pelo operador de planta. As especificações ou objetivos de controle são definidas por :

- erro nulo em regime permanente
- sobrepasso máximo admissível (Somax)
- subpasso máximo admissível (Sumax)

O gráfico da figura 2.4 mostra como são definidas as especificações Somax e Sumax para duas respostas a mudança de referência diferentes. Embora as duas respostas satisfaçam às especificações, uma delas apresenta um tempo menor de resposta. Este fato foi considerado durante a elaboração do sistema de regras,

que procura implicitamente otimizar o tempo de resposta do processo através do ajuste dos parâmetros do controlador.

As especificações no caso de perturbações de carga são definidas da mesma maneira, sendo o primeiro pico considerado como se fosse uma mudança de referência. Assim o segundo pico deve satisfazer a especificação de  $S_{\text{omax}}$ , enquanto o terceiro pico deve satisfazer a especificação de  $S_{\text{umax}}$  (Fig. 2.5)

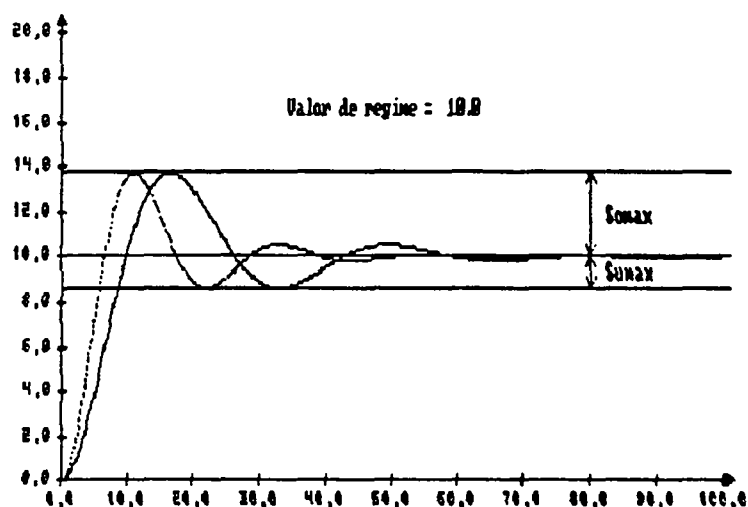


Fig 2.4 - Especificações para mudanças de referência

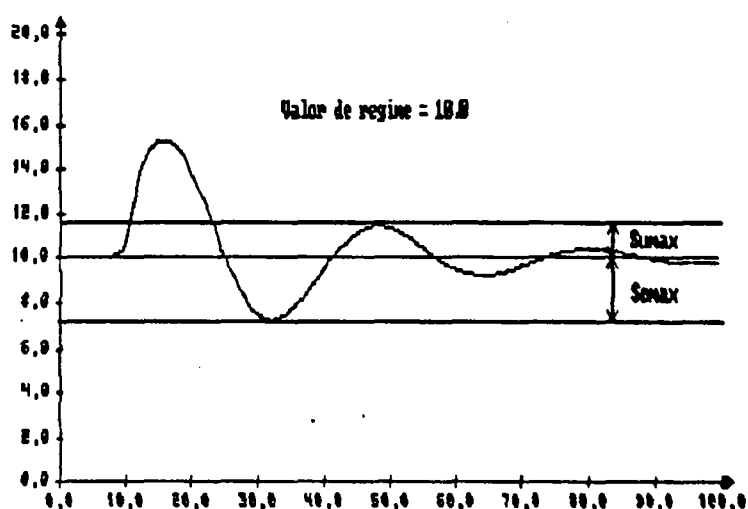


Fig 2.5 - Especificações para perturbações de carga

As respostas do sistema podem ser classificadas dentre dez grupos padrões diferentes (apêndice A), de acordo com a ausência ou presença de picos e vales,

posição relativa dos picos e vales com respeito às especificações e ao sinal de referência, e a diferença entre os dois primeiros picos e os dois primeiros vales.

Para cada grupo padrão (apêndice A) de resposta do sistema há uma estratégia de ajuste particular. O problema de ajuste dos parâmetros do controlador é resolvido fazendo-se com que o sistema seja levado a um estado específico (grupo padrão 2). Em seguida uma metodologia de fase, baseada no ajuste dos parâmetros  $T_i$  (tempo integrativo) e  $T_d$  (tempo derivativo) do controlador, é aplicada. No cálculo também é utilizado o período de oscilação amortecido ( $T_a$ ) do sistema. O tempo de resposta, sujeito as restrições  $S_{\max}$  e  $U_{\max}$ , é minimizado através do ajuste da fase ótima do PID (taxas integrativa e derivativa). Experimentalmente foi determinada, para um universo importante de processos, a relação entre a contribuição de fase ótima do controlador e a relação  $L/\tau$  (apêndice C), extraída na fase inicial de ajuste a partir da curva de reação.

A relação  $L/\tau$  modifica-se sempre que ocorre uma mudança na dinâmica do processo. A fim de reavaliar esta relação dinamicamente a partir da resposta de malha fechada, um conjunto de regras associadas a alguns grupos de padrões de ondas tem a característica de mudar somente um dos parâmetros do PID ( $T_i$  ou  $T_d$ ) e sinalizar qual dos parâmetros foi alterado. Assim, sempre que ocorrer mudanças na dinâmica da planta, o ajuste do controlador torna-se ruim e faz com que o sistema tenha uma resposta de acordo com um dos grupos que modificam um único parâmetro do controlador independentemente da relação  $L/\tau$ . Durante o ciclo de ajuste dos parâmetros do controlador, quando o grupo 2 for atingido, a relação  $L/\tau$  é reavaliada. As taxas integrativa ( $T_i/T_a$ ) e derivativa ( $T_d/T_a$ ) são funções da relação  $L/\tau$  e parametrizadas para diferentes valores de pontos de inflexão da curva de reação do processo (Apêndice C). Assim, sempre que uma dessas taxas for alterada devido à modificação dos valores de  $T_i$  e  $T_d$ , significa que a relação  $L/\tau$  deve ser atualizada. Se, por exemplo, o valor de  $T_i$  foi modificado, a taxa integrativa é calculada e o valor da relação  $L/\tau$  pode ser obtido através das curvas que definem o valor da taxa integrativa em função da relação  $L/\tau$ . Como estas curvas são parametrizadas pelo valor do ponto de inflexão da curva de reação do processo e não há condições de conhecer o valor do ponto de inflexão, pois a dinâmica do processo mudou, o conjunto de curvas parametrizadas é substituído por uma média dos pontos de cada curva correspondentes ao novo valor da taxa integrativa.



O ganho proporcional ( $K_C$ ) é o último parâmetro a ser ajustado e é determinado a partir de uma lei empírica baseada na variação dos valores de  $T_i$  e  $T_d$ , do valor de  $S_{\text{omax}}$  e do valor de  $S_{\text{umax}}$ .

A metodologia de ajuste consiste, portanto, em levar a resposta do sistema para o grupo 2 e a seguir ajustar os ângulos de avanço e atraso do controlador, a fim de minimizar o tempo de resposta do sistema. Em seguida o ganho proporcional ( $K_C$ ) necessário para compensar as mudanças provocadas pelo ajuste de  $T_i$  e  $T_d$  e obter as especificações desejadas é calculado.

## 2.6. Conclusão

Neste capítulo as estratégias utilizadas para inicialização do controlador (mecanismo de ajuste automático) e para adaptação frente a mudanças na planta (mecanismo de auto-ajuste) foram apresentadas. A abordagem empregada baseou-se no reconhecimento das formas de onda da resposta do sistema.

O objetivo de desenvolver-se um controlador de propósito geral motivou a utilização de técnicas de inteligência artificial. A idéia básica consistiu em tornar disponível com o sistema o maior número possível de estratégias de ajuste para diferentes situações, semelhantemente ao comportamento de um especialista humano. O trabalho do especialista humano consiste em observar a resposta do sistema, analisar se é satisfatória e caso necessário alterar os parâmetros do controlador. De forma semelhante o controlador PID-AA realiza o reconhecimento da resposta, classifica-a e efetua as mudanças necessárias nos parâmetros do controlador.

O sistema especialista empregado neste trabalho é um sistema de produção ou sistema baseado em regras. Estudos realizados com este tipo de sistema mostraram que 90% do tempo de execução é gasto durante o ciclo de geração de conflitos da máquina de inferência. Além disto estes estudos enfatizam o fato de que as ferramentas de software para sistemas especialistas tem uma característica fortemente dedicada [Mettrey 87]. Desta maneira justifica-se o desenvolvimento do sistema SPP, que além de ser dedicado para a presente aplicação, utiliza uma estratégia de pré-compilação das regras, a fim de minimizar o tempo de execução do sistema.

## CAPÍTULO III

### Implementação do Controlador PID-AA

#### 3.1. Introdução

No capítulo anterior foram apresentados de forma resumida os trabalhos anteriores realizados, nos quais se baseou a implementação deste controlador.

O controlador desenvolvido possui características particulares que o diferenciam dos controladores PID a parâmetros fixos normalmente disponíveis no mercado. Assim a implementação do presente controlador não se limita apenas a elaboração de rotinas de aquisição do sinal de saída, cálculo e aplicação do controle. Desta maneira inicialmente serão apresentadas as especificações funcionais para a implementação do controlador desenvolvido, visando sua aplicação em ambiente industrial.

Com base nas especificações exigidas, uma arquitetura para o controlador foi projetada. Esta arquitetura é constituída por diferentes módulos. Cada módulo é responsável pela execução de tarefas específicas e bem definidas. Neste capítulo será descrita a arquitetura do controlador implementado e os diferentes módulos que a compõem serão apresentados separadamente.

No final do capítulo, algumas considerações sobre a implementação do controlador industrial definitivo serão apresentadas. Desta maneira espera-se, através da experiência adquirida ao longo do trabalho, contribuir de maneira positiva na implementação do controlador definitivo.

#### 3.2. Especificação funcional do controlador

Neste item será apresentada a especificação funcional do protótipo de um controlador industrial, baseado no PID Auto-Ajustável desenvolvido. Este protótipo deve permitir o controle seguro de processos industriais, segundo três modos de funcionamento: manual, automático (parâmetros fixos) e auto-ajustável (adaptativo). Desta forma o protótipo deverá possuir:

- \* interface de entrada/saída com o processo a ser controlado
- \* mecanismos de tratamento de sinais com ruído;
- \* interface de alto nível (homem/máquina) para permitir a interação completa do operador com o controlador e o processo sob controle;

- \* mecanismos de supervisão para garantir o funcionamento seguro do sistema, mesmo em condições adversas;
- \* mecanismos de gerenciamento de tarefas.

### 3.2.1. Modos de funcionamento

O controlador implementado deve permitir o controle de processos segundo os seguintes modos de funcionamento:

- \* manual : neste modo a ação de controle é determinada pelo operador de planta e o processo é controlado em malha aberta, com o algoritmo do PID desligado.
- \* automático : o controlador opera em malha fechada e a ação de controle é calculada por um algoritmo PID a parâmetros fixos. O operador deve poder determinar o valor do sinal de referência.
- \* auto-ajustável: o controlador utiliza um algoritmo PID, cujos parâmetros podem ser alterados conforme sejam detectadas variações na planta sob controle. Os parâmetros do controlador são ajustados em malha fechada por meio de mecanismos adaptativos.

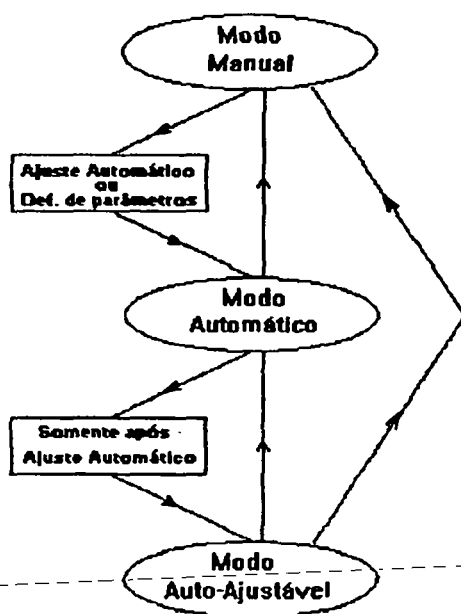


Fig. 3.1 – Mudanças possíveis entre modos

A figura 3.1 ilustra as transições permitidas entre os modos de funcionamento possíveis. Na passagem do modo manual para modo automático o operador deve poder optar por definir os parâmetros do controlador diretamente

ou utilizar um mecanismo de ajuste automático ("auto-tuning"). A passagem para o modo auto-ajustável deverá exigir sempre a realização do ajuste automático. As transições entre modos no sentido oposto aos já mencionados, não necessitam de cuidado maiores.

Todas as transições ou alterações de parâmetros devem ser realizadas de forma a não perturbar o funcionamento do sistema sob controle. Neste sentido deverá ser implementada uma estratégia de transferência suave entre modos de funcionamento e troca de parâmetros ("bumpless transfer").

### 3.2.2. Interface de entrada e saída

Esta interface deve ser responsável pela interação do sistema com o processo a ser controlado e ser composta por duas partes distintas : uma em "hardware" e outra em "software".

O "hardware" da interface deve ser constituído por :

- \* conversor A/D com no mínimo 10 bits de resolução
- \* conversor D/A com no mínimo 10 bits de resolução
- \* filtro analógico de entrada do tipo passa-baixa
- \* relógio de tempo real programável

O tempo de conversão necessário para os conversores não é um fator crítico, pois o universo de processos para os quais o sistema foi desenvolvido não impõe restrições a este respeito. Portanto conversores de baixo custo são suficientes.

O "software" de interface deve ser constituído por rotinas de leitura e escrita nos conversores de sinal. Como normalmente os sinais apresentam ruído, uma rotina que possibilite o tratamento do sinal deve ser utilizada.

As rotinas que realizam a leitura/escrita nos conversores e implementam o algoritmo do PID devem ser executadas em resposta a um pedido de interrupção por "hardware". O intervalo de tempo entre cada pedido de interrupção deve corresponder ao tempo de amostragem do controlador. O relógio de tempo real deve ser responsável pela contagem correta do tempo de amostragem.

A fim de permitir a comunicação externa do controlador, rotinas de comunicação e interfaces do tipo serial ou paralela devem ser previstas.

### 3.2.3. Interface homem/máquina

Esta interface deve permitir a interação do operador da planta com o sistema. Por meio desta interface o operador deve poder receber informações, através de um terminal de vídeo ou de um painel frontal, e poder executar diferentes ações ou agir em resposta às informações recebidas.

As seguintes informações devem ser disponíveis para o operador de planta:

- monitorar as variáveis controlada e de controle através de gráficos de tendência e de seus valores;
- monitorar o mecanismo de auto-ajuste;
- monitorar o mecanismo de ajuste automático;
- receber mensagens de alarmes do sistema;
- observar o valor dos parâmetros do controlador

O operador de planta, através da interface, deve poder:

- executar a configuração inicial do controlador;
- determinar a execução do ajuste automático;
- selecionar o modo de funcionamento do controlador: manual, automático ou auto-ajustável;
- alterar os parâmetros do PID;
- mudar o valor da referência;
- interromper a execução de alguma tarefa;
- agir em resposta a um sinal de alarme;
- definir, no modo manual, o valor da ação de controle;
- executar o reconhecimento automático da faixa de ruído;

Esta interface está intimamente relacionada a maneira como será implementado o controlador industrial definitivo. Portanto algumas das funções relacionadas, embora possam ser interessantes, podem ser inviáveis conforme a implementação. Por exemplo, caso a implementação não disponha de monitores de vídeo, a monitoração dos sinais por gráficos de tendência deve ser omitida ou substituída por outra forma de apresentação.

### 3.2.4. Supervisor

Para garantir as condições de funcionamento seguro do sistema e o tratamento de situações de alarme, um mecanismo supervisor deve ser utilizado ("safety jacket"). Desta maneira o supervisor deve conhecer a qualquer instante de operação o estado corrente do sistema. Entretanto o operador de planta deve possuir o maior nível de prioridade sobre o funcionamento do sistema e sempre deve ser informado quando alguma situação anormal ocorrer.

O mecanismo de supervisão deve contribuir para aumentar o grau de automatização do controlador sobre a malha de controle, através da realização de tarefas próprias de um operador de planta e relacionadas à operação segura do sistema. Portanto este mecanismo deve ser capaz de tomar decisões, quando o sistema começar a tornar-se instável ou alguma situação de alarme for detectada. Além destas funções, o supervisor deve ser responsável pela validação de valores calculados durante o funcionamento normal do controlador.

Neste sentido, o supervisor deve ser responsável por:

- supervisão do mecanismo de auto-ajuste do controlador;
- validação das informações obtidas nos reconhecimentos de formas de onda, em malha aberta e malha fechada;
- validação dos parâmetros do ajuste inicial;
- validação dos parâmetros resultantes de um ciclo de ajuste;
- detecção de ocorrência de instabilidade;
- tratamento de situações de alarme.

Devido às características do sistema de regras, a estabilidade total do controlador não pode ser completamente garantida. Desta forma o supervisor deve ser também capaz de evitar que situações não previstas inicialmente, na elaboração do sistema de regras, provoquem condições de funcionamento perigosas.

### 3.2.5. Gerenciamento de tarefas

Devido às diferentes tarefas executadas no funcionamento do controlador, faz-se necessário um mecanismo de gerenciamento. O gerenciador deve permitir, em função do estado atual da aplicação, definir o conjunto de tarefas a serem executadas e o seu seqüenciamento correto.

Este mecanismo pode ser concentrado em um único módulo de programa (gerenciador) ou ser distribuído ao longo de todo o sistema, através de estruturas de controle da execução das tarefas localmente. A forma de implementação do mecanismo gerenciador está condicionada aos recursos disponíveis de "software" e "hardware".

Dentre as diferentes tarefas que devem ser controladas pelo gerenciador pode-se citar:

- \* configuração inicial do sistema
- \* ajuste automático
- \* mudança entre os modos de funcionamento
- \* mudança dos parâmetros do controlador
- \* passagem de parâmetros e compartilhamento de variáveis globais entre as diferentes tarefas
- \* comunicação do controlador com o operador de planta, através da interface homem/máquina
- \* interface de entrada/saída
- \* atualização de dados, para apresentação de gráficos ou análise pelo mecanismo supervisor
- \* controle de pedidos de interrupção
- \* ocorrência de alarmes detectados pelo supervisor

### 3.3. Arquitetura do sistema desenvolvido

Considerando a especificação funcional apresentada, será descrita a seguir a arquitetura do sistema implementado. Esta arquitetura possui diferentes módulos, cada um destes apresenta características funcionais bem definidas, operam independentemente e comunicam-se entre si através do compartilhamento de variáveis.

A figura 3.2 apresenta a arquitetura do sistema desenvolvido na forma de um diagrama de blocos.

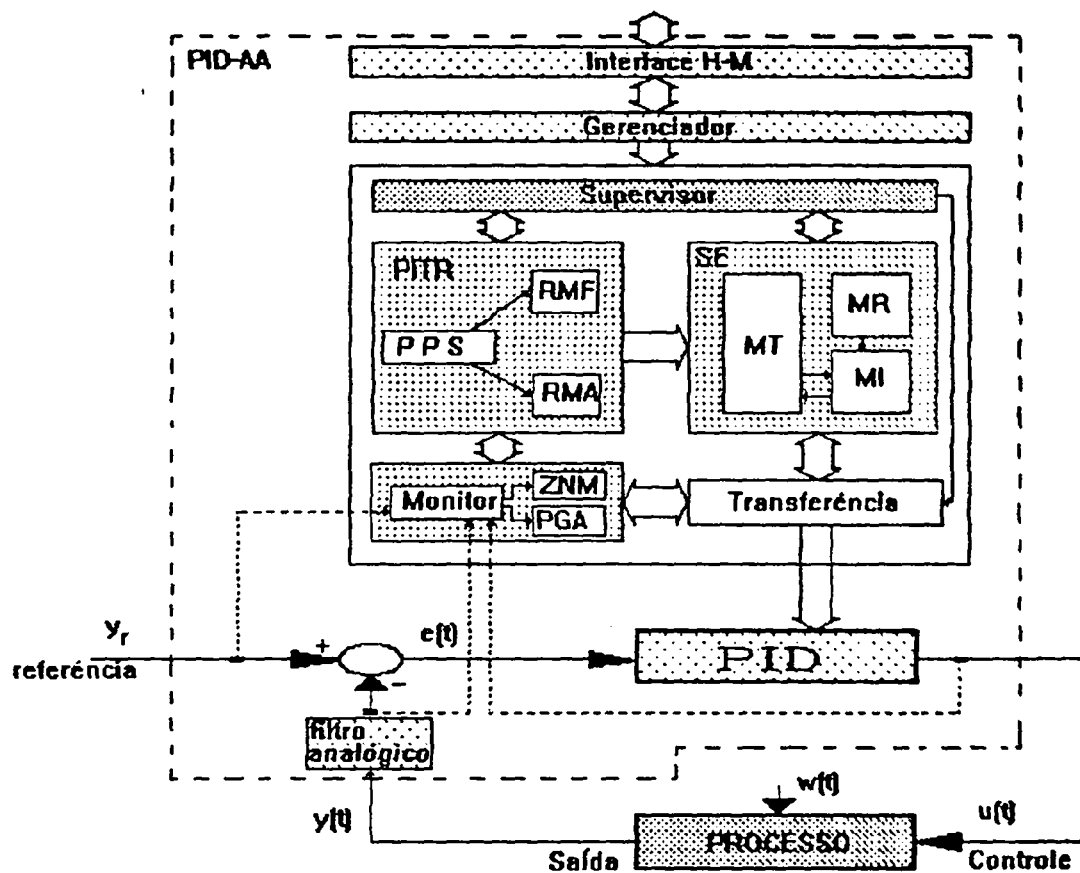


Fig. 3.2 – Arquitetura do sistema desenvolvido

Nesta arquitetura preserva-se a estrutura original do controlador PID, que corresponde ao módulo do algoritmo do PID, ao qual são adicionados outros módulos que implementam o sistema de auto-ajuste. Assim, a partir de um controlador PID clássico, obteve-se um controlador mais sofisticado e que incorpora técnicas de controle adaptativo.

O sistema desenvolvido está dividido segundo os seguintes módulos :

- \* algoritmo do PID (PID)
- \* monitor
- \* processador de informação em tempo real (PITR)
- \* sistema especialista (SE)
- \* transferência
- \* supervisor



- \* gerenciador
- \* interface homem/máquina

### 3.3.1. Módulo do algoritmo do PID

Este módulo implementa o controlador PID discreto obtido a partir de seu equivalente contínuo. Existem diferentes formas de implementação para controladores do tipo PID [Apolônio 88], por este motivo salienta-se que o sistema desenvolvido baseia-se numa destas implementações possíveis em particular. Assim as técnicas de ajuste devem ser modificadas adequadamente conforme a implementação do controlador PID utilizada. Este módulo é executado a cada período de amostragem.

A lei de controle implementada neste trabalho é dada por :

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (3.1)$$

onde :  $u(k)$  - sinal de controle aplicado

$e(k)$  - sinal de erro =  $y_r(k) - y(k)$

$$K_1 = K_c \left( 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{2T_i} \right)$$

$$K_2 = -K_c \left( 1 - \frac{2T_d}{T} + \frac{T}{2T_i} \right)$$

$$K_3 = K_c \frac{T_d}{T}$$

$K_c$  = ganho proporcional

$T_d$  = tempo derivativo

$T_i$  = tempo integrativo

$T$  = período de amostragem

A lei de controle considerada, onde as ações proporcional, integral e derivativa do controlador são funções do valor do erro, possui o inconveniente de provocar a sobrecarga da ação integral devido a saturação da ação de controle. Para contornar este problema foi incorporada ao algoritmo implementado uma estratégia de eliminação da sobrecarga da ação integral por atualização de variáveis. [Bruciapaglia 86]

### 3.3.2. Módulo Monitor

Este módulo é responsável pela observação contínua da variável controlada, do valor da referência e do sinal de controle. Através da observação destas variáveis, o módulo monitor pode ordenar a execução de três outros módulos : Pitr, ZNM e PGA. O monitor é responsável também por determinar se o sistema encontra-se em estado de regime, ou seja, se a resposta do sistema está dentro da faixa de ruído.

Este módulo é responsável ainda pela determinação da Faixa de Ruído (Apêndice D). A faixa de ruído define uma amplitude de incerteza associada aos valores dos sinais lidos da planta, devido à presença de ruído nos sinais. O reconhecimento da Faixa de Ruído é realizado através da monitoração do sinal de saída por um certo tempo, após o qual o sistema informa para o operador o valor calculado para FR. O operador pode confirmar o valor calculado pela rotina ou fornecer o valor mais adequado através do módulo de interface.

Durante a execução do ajuste inicial, o monitor ativa o reconhecimento de malha aberta do módulo Pitr no instante de aplicação do degrau na ação de controle. Após o reconhecimento o módulo ZNM é executado e os resultados deste são transferidos para o algoritmo do PID através do módulo de transferência.

O módulo Pitr também é ativado pelo monitor durante o modo auto-ajustável devido a mudanças de referência ou a perturbações de carga. Para determinar o tipo de resposta em malha fechada que ocorre num dado momento, o sinal de referência é monitorado. Assim sabe-se que a resposta é devida a mudanças de referência quando o valor da referência é alterado, caso contrário a resposta é devida a uma perturbação de carga. Perturbações de carga só ativam o Pitr caso sejam maiores que o dobro da faixa de ruído.

O monitor determina a execução do PGA sempre que uma mudança de referência é realizada. A cada novo ponto de operação os parâmetros de  
perturbação são obtidos a partir dos valores armazenados nas tabelas do módulo  
do PGA.

#### 3.3.2.1. Módulo ZNM

Este módulo é responsável pelo cálculo dos parâmetros iniciais do controlador PID, através do mecanismo de ajuste automático que utiliza o método de ZNM.

O ajuste inicial do controlador, que consiste no caso de um PID em determinar os valores dos parâmetros ganho proporcional( $K_c$ ), tempo derivativo ( $T_d$ ) e tempo integrativo ( $T_i$ ), normalmente é uma tarefa que consome muito tempo e necessita de pessoal qualificado para ser executada. O objetivo deste mecanismo é adicionar ao controlador desenvolvido as facilidades e vantagens do ajuste automático dos parâmetros iniciais do controlador ("auto-tuning").

O mecanismo de ajuste automático utiliza as informações do reconhecimento de malha aberta do sistema e através do método de Ziegler Nichols Modificado (ZNM) [Pagano 88, Saul 92] determina dois conjuntos de parâmetros para o controlador PID-AA : um para mudanças de referência e outro para perturbações de carga.

Após realizado o ajuste automático dos parâmetros iniciais do controlador, o sistema está convenientemente inicializado. Neste momento o operador de planta pode alterar o modo de funcionamento do controlador para o modo automático. Deve-se salientar que a mudança do modo manual para automático só deve ser feita, após o ajuste inicial ter sido ao menos uma vez realizado.

### 3.3.2.2. Planejamento de Ganho (PGA)

O objetivo deste módulo é melhorar o funcionamento do controlador no caso da planta apresentar não-linearidades. Nestes casos os parâmetros ótimos do controlador dependem do ponto de operação. O sistema implementado apresenta dois conjuntos de parâmetros : um para mudanças de referência (parâmetros de referência) e um para perturbações de carga(parâmetros de perturbação). Assim, uma vez definido o ponto de operação, que neste caso é determinado pelo valor da referência, o PID passa a funcionar apenas como regulador rejeitando perturbações de carga e com os parâmetros de perturbação.

O planejamento de ganho desenvolvido consiste em armazenar os parâmetros de perturbação para cada ponto de operação. Assim, sempre que o ponto de operação for modificado, o que corresponde a alterar o valor da referência, o conjunto de parâmetros de perturbação para o novo ponto de operação pode ser resgatado da memória e substituído no PID através do módulo do sistema especialista. Desta maneira evita-se que o regulador funcione com os parâmetros de perturbação do ponto de operação anterior, os quais podem não ser adequados. Na ocorrência de uma perturbação de carga no novo ponto de operação, o sistema calculará um novo conjunto de parâmetros de perturbação

ótimos e a memória pode ser atualizada, a fim de adaptar-se frente a possíveis alterações ocorridas no processo.

Inicialmente a tabela de armazenamento de parâmetros de perturbação encontra-se vazia. Assim, todos os parâmetros que vão sendo calculados são também armazenados. A tabela que armazena os valores dos parâmetros para diferentes pontos de operação por razões físicas possui um número limitado de posições disponíveis. Desta maneira, após a tabela estar totalmente ocupada, antes que um novo conjunto de parâmetros seja armazenado, deve-se realizar uma avaliação, a fim de determinar se estes novos parâmetros acrescentam novas informações à tabela. Para isto uma função de avaliação realiza uma ponderação com base na variação percentual dos novos parâmetros com relação aos parâmetros armazenados para os pontos de operação vizinhos. No caso da diferença ser maior que a menor variação percentual presente na tabela, o novo conjunto de parâmetros é armazenado no espaço de memória correspondente àquele ponto de operação onde a diferença era a menor e este ponto de operação é descartado.

Desta maneira o sistema pode adquirir conhecimento sobre a planta dinamicamente e constantemente ser atualizado de modo a adaptar-se, caso as condições de funcionamento sejam modificadas com o decorrer do tempo. Embora este módulo tenha sido implementado, testes de funcionamento e validação ainda são necessários.

### 3.3.3. Módulo Processador de Inf. em Tempo Real(PITR)

A ação de controle e a variável controlada são observadas constantemente, a cada período de amostragem, pelo módulo monitor. Estas variáveis são então passadas ao PITR, a fim de que as informações nelas contidas sejam processadas e analisadas.

O módulo PITR é responsável pela extração das informações contidas nas respostas do sistema e pela transformação destas numa forma compatível com a utilizada pelo módulo do sistema especialista.

Este módulo está dividido em três outros módulos menores: pré-processamento do sinal (PPS), reconhecimento de malha aberta (RMA) e reconhecimento de malha fechada (RMF).

### 3.3.3.1. Pré-processamento do sinal

O principal problema na implementação do controlador desenvolvido para funcionamento em ambientes industriais é a existência de ruído nos sinais adquiridos da planta. A presença do ruído nos sinais não pode ser totalmente evitada, mas seu efeito pode ser bastante diminuído ou contornado através de técnicas adequadas.

O sinal recebido do sensor do processo é previamente filtrado antes de ser amostrado. O filtro analógico utilizado é do tipo passa-baixa (1ª ordem) e desempenha duas funções:

- \* elimina o efeito de "aliasing";[Åström 84]
- \* aumenta a relação sinal/ruído antes da fase de pré-processamento.

Estudos mostraram que para uma constante de tempo do filtro analógico igual a metade do período de amostragem do sistema, o efeito de "aliasing" é reduzido cerca de 90 % para o caso de ruído branco[Bennett 88]. Desta maneira torna-se interessante a utilização de um filtro deste tipo na aquisição dos sinais. Entretanto quando a constante de tempo do sistema é maior que alguns segundos, a construção de filtros analógicos torna-se inviável, devido a necessidade de capacitores muito grandes. Assim a combinação de um filtro passa-baixa analógico com um filtro passa-baixa digital pode ser utilizada.

No controlador implementado o sinal sempre é filtrado antes de ser amostrado e convertido num sinal digital. Entretanto o sinal ainda é pré-processado para diminuir os efeitos do ruído de planta, sempre que alguma rotina de reconhecimento de forma de onda da resposta é executada. O pré-processamento utilizado consiste na aplicação de um método para extrair do sinal recebido da planta a forma de onda da resposta original caso não existisse o ruído.

O pré-processamento do sinal utiliza um método de ajuste de curvas desenvolvido para este fim. No próximo capítulo serão analisados detalhadamente todos os aspectos envolvidos na utilização deste método, a fim de eliminar os efeitos nocivos do ruído presente no sinal proveniente da planta a ser controlada.

### 3.3.3.2. Reconhecimento de Malha Aberta (RMA)

O reconhecimento de malha aberta, realizado com o controlador operando no modo manual, é essencial para o funcionamento correto do controlador e corresponde a aquisição de conhecimento "a priori" do sistema. O conhecimento do ponto de inflexão e da relação entre o tempo de atraso efetivo ( $L$ ) e a constante de tempo equivalente do processo ( $\tau$ ) são utilizados pelo sistema especialista para a determinação do ajuste "ótimo" do controlador.

As informações do reconhecimento de malha aberta são obtidas, de maneira automática, através da curva de reação do processo. Estas informações são utilizadas no ajuste inicial dos parâmetros do controlador.

A execução do reconhecimento é realizada a critério do operador de planta, que deve fornecer : o tempo máximo de reconhecimento ( $T_{max}$ ) e amplitude do degrau a ser aplicado ( $\Delta U$ ). O tempo de reconhecimento depende do processo a ser controlado. Assim o operador deve ao menos ter uma noção da constante de tempo do processo, de modo a fornecer tempo suficiente para que o reconhecimento seja realizado corretamente. O valor da amplitude do degrau aplicado deve ser escolhido de modo a não provocar uma variação muito grande na saída, o que em alguns casos pode ser perigoso ou anti-econômico.

O reconhecimento de malha aberta é realizado de acordo com as seguintes etapas :

- a - definição pelo operador de  $T_{max}$  e  $\Delta U$
- b - determinação automática da Faixa de Ruído
- c - armazenamento da curva de reação
- d - pré-processamento dos pontos armazenados
- e - reconhecimento de malha aberta
- f - validação das informações pelo módulo supervisor

Após o reconhecimento ser executado com sucesso, os parâmetros iniciais do controlador podem ser calculados através do método de ZNM, implementado pelo módulo ZNM.

### 3.3.3.3. Reconhecimento de malha fechada (RMF)

O reconhecimento de malha fechada é realizado somente quando o controlador está no modo de funcionamento auto-ajustável. Dois casos distintos podem ocorrer: respostas a mudanças de referência e respostas a perturbações de carga.

O conjunto de parâmetros ótimos do controlador é diferente para resposta a mudanças de referência e para perturbações de carga. Por esta razão, além de necessitar de dois tipos de reconhecimento da resposta (Fig.3.3), o controlador implementado trabalha com dois conjuntos distintos de parâmetros : um conjunto para mudanças de referência e um para perturbações de carga.

Uma importante característica deste controlador é o aproveitamento das próprias perturbações exógenas do sistema (mudanças de referência e perturbações de carga, ambas pertencentes à classe dos sinais constantes) como geradoras do ciclo de ajuste. Portanto não é necessário introduzir outro tipo de sinal para excitar o sistema.

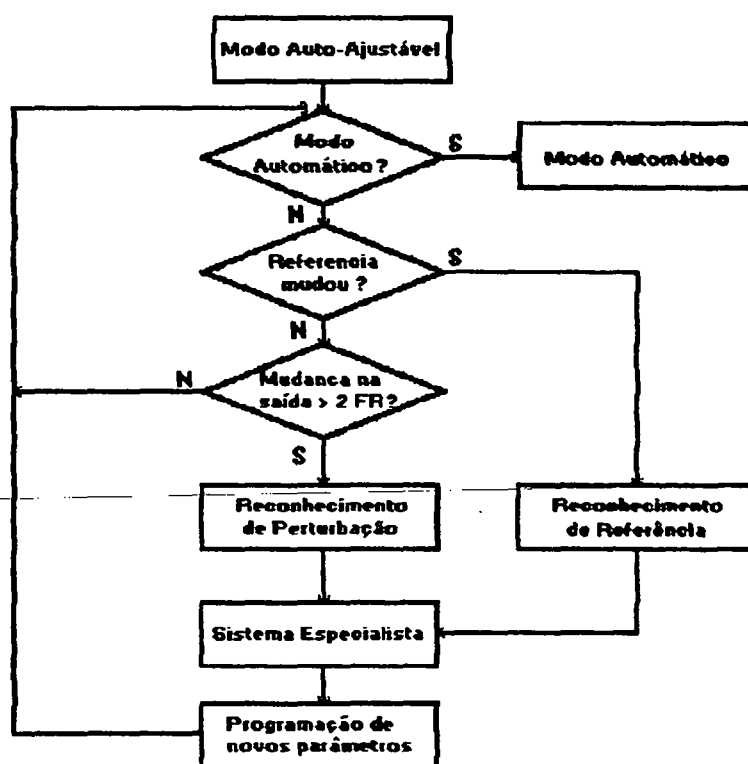


Fig. 3.3 – Funcionamento do modo auto-ajustável

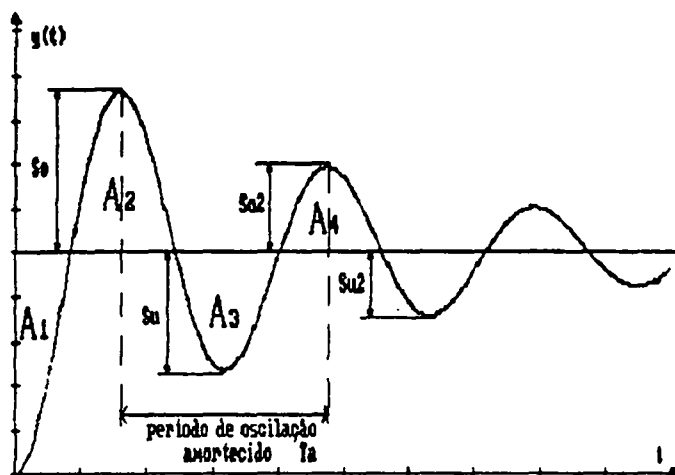


Fig. 3.4 - Informações de malha fechada

O reconhecimento é realizado a partir das informações fornecidas pelo pré-processador de sinais. Assim o ruído presente no sinal original não interfere no reconhecimento de malha fechada.

Através do reconhecimento da resposta do sistema em malha fechada são retiradas informações sobre o valor dos máximos e mínimos locais e do período de oscilação amortecido. As informações de malha fechada necessárias para o sistema especialista de ajuste estão definidas na figura abaixo (Fig.3.4). As seguintes informações são necessárias para o sistema especialista de ajuste :  $S_o$ ,  $S_u$ ,  $S_{o2}$ ,  $S_{u2}$  e  $T_a$ .

Além destas informações, são obtidas também informações sobre as áreas definidas pela curva de resposta e a reta horizontal que determina o valor da referência. Estas informações são utilizadas pelo sistema especialista a fim de tornar o mecanismo de ajuste dos parâmetros do controlador mais robusto.

### 3.3.4. Módulo do sistema especialista

Este módulo foi implementado através da utilização do sistema de produção constituído pelo SPP. Nele está contido, na forma de um conjunto de regras de ajuste, todo o conhecimento acumulado resultante da experiência de operadores de planta no ajuste de controladores.

A memória de regras (MR) do PID-AA está organizada em grupos de regras que cumprem diferentes funções. Esta organização é realizada via planejamento de contexto: o conjunto total de regras é separado em subconjuntos através de



quatro níveis de atuação. Estes níveis permitem seqüencializar a operação da MI sobre a MR diminuindo, conseqüentemente, o número de regras avaliadas a cada ciclo de ajuste implicando numa redução do tempo de execução. A estrutura da MR implementada no SE é mostrada na figura 3.5.

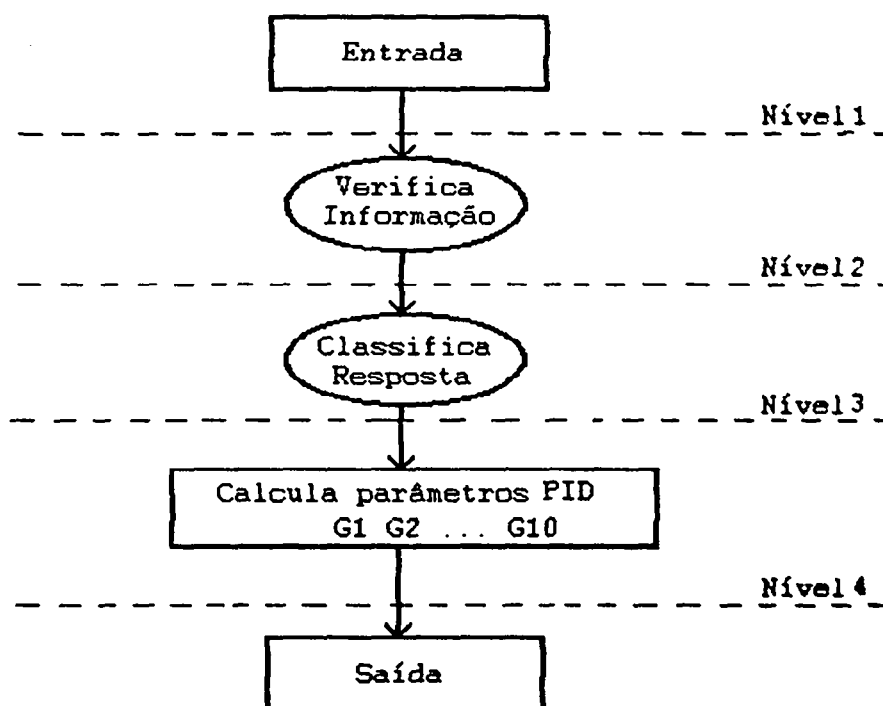


Fig. 3.5 Estrutura da memória de regras.

Um ciclo de ajuste do controlador é composto de vários ciclos de inferência. A cada ciclo de inferência ("match", "select", "execute") é disparada uma regra da MR e, conseqüentemente, é atualizada a MT. A regra disparada pertence a um dos subgrupos de regras organizados segundo o planejamento de contexto previsto. Dentro desta estrutura existem regras que encadeiam os diferentes subgrupos. A seguir detalhamos os diferentes subgrupos de regras.

Antes que as informações dos valores das áreas calculadas sejam passadas para o sistema especialista, os valores obtidos são comparados com o valor da área A1. Aqueles valores que são muito pequenos são igualados a zero. Desta maneira, em alguns exemplos dados a seguir, a verificação se alguma área é nula, é perfeitamente aplicável.

#### A) Verificação da informação:

Este subconjunto de regras verifica a coerência das informações obtidas pelo módulo PITR. Informações que não são adequadas a uma certa lógica prevista são descartadas nesta fase. Por exemplo:

```
Se  (A1 <> 0.0)
    (A2 = 0.0)
    (A3 <> 0.0)
    (A4 <> 0.0)
Então
    (erro de reconhecimento)
```

onde A1, A2, A3, A4 são as áreas medidas sobre a curva da resposta.

No caso de que algum erro seja detectado as informações obtidas são desprezadas e o ciclo de ajuste é abortado.

#### B) Classificação da resposta

Uma vez verificada a coerência dos dados, a resposta é classificada em um dos grupos correspondentes aos dez padrões de forma de onda mostrados no apêndice A. Por exemplo para o grupo 2 temos a seguinte regra:

```
Se  (So > Somax)
    (Su > Sumax)
    (Ta > 0.0)
Então
    (grupo 2)
```

onde So, Su, Ta são respectivamente sobrepasso, subpasso e período de oscilação amortecido medidos sobre a curva de resposta, Somax e Sumax correspondem às especificações de controle.

O grupo classificado é validado através de regras que testam a coerência do padrão de resposta com os valores das áreas medidas. Por exemplo:

```
Se  (grupo 2)
    (A1 <> 0.0)
    (A2 <> 0.0)
    (A3 <> 0.0)
Então
    (classificação correta)

Se  (grupo 2)
    (A1 <> 0.0)
    (A2 <> 0.0)
    (A3 = 0.0)
Então
    (falha na classificação)
```

A ocorrência de uma falha na classificação faz com que o ciclo de ajuste seja abortado.

### C) Cálculo dos parâmetros do PID

Nesta etapa do ciclo de ajuste são calculados os novos parâmetros do PID a partir dos dados fornecidos ao sistema. Um subgrupo de regras, que atualizam os parâmetros do controlador, é selecionado através das seguintes informações: tipo de processo, tipo de excitação (referência ou perturbação de carga) e grupo classificado. Neste subgrupo de regras está sintetizado todo o conhecimento empírico e teórico sobre o ajuste de controladores PID.

O conhecimento pode ser dividido segundo dois aspectos: um abrange o conhecimento qualitativo e o outro o conhecimento quantitativo. Assim, na informação "o parâmetro  $T_i$  deve ser aumentado de 50%", o conhecimento qualitativo é manifestado pela decisão de aumentar o valor de  $T_i$ , enquanto o conhecimento quantitativo determina o valor que o parâmetro deve assumir. A implementação do conhecimento quantitativo exige a utilização de mecanismos de representação adequados (por ex. técnicas de conjuntos difusos - "fuzzy-sets").

Na implementação deste sistema foi adotado um mecanismo de quantização baseado em curvas de ajuste. Estas curvas permitem modificar o valor de um dado atributo segundo a magnitude de um outro. Por exemplo, o atributo "delta- $K_c$ " que define a variação sobre o parâmetro  $K_c$  é quantificado como uma função do atributo "delta- $S_o$ " que define a variação do sobrepasso em relação à especificação [Pagano, 1989]. Este mecanismo é complementado com uma série de estratégias (filtros, índices de sensibilidade, memória temporal a curto e longo prazo, etc.) para melhorar o seu funcionamento.

A memória de regras implementada possui atualmente 200 regras (regras de verificação da coerência dos dados, de classificação da resposta, de ajuste do PID, de validação dos parâmetros obtidos). É importante ressaltar que novas regras podem ser adicionadas a este sistema de forma a contornar situações de funcionamento não consideradas neste trabalho. Desta maneira este sistema é aberto e muito flexível em relação a integração de novas regras em sua base de conhecimento.

### 3.3.5. Módulo de Transferência

Este módulo controla a transferência de parâmetros entre o sistema especialista, o algoritmo do PID e o monitor. Além disso é responsável também pela mudança entre os modos de funcionamento manual e automático e pela atualização da tabela utilizada pelo módulo PGA.

#### 3.3.5.1. Mudança de parâmetros do controlador

O sistema especialista a cada ciclo de ajuste determina novos parâmetros para o controlador. Estes parâmetros após validados pelo supervisor são transferidos pelo módulo de transferência para o algoritmo do PID, quando necessário. No momento em que os parâmetros do controlador são alterados, o sistema deve estar em estado de regime (dentro da FR), a fim de evitar que a troca de parâmetros introduza uma perturbação no sistema. Assim a transferência de parâmetros deve ser realizada de modo suave.

Além da troca dos parâmetros do controlador após cada ciclo de ajuste, existe ainda a troca de parâmetros devido ao conjunto de parâmetros "ótimos" do controlador para respostas a mudanças de referência ser diferente do conjunto "ótimo" para perturbações de carga.

A maior parte do tempo o controlador funciona como um regulador e não é possível determinar o instante de ocorrência de uma perturbação. Assim o controlador sempre está programado com os parâmetros de perturbação. Ao ser realizada uma mudança de referência, antes da mudança ser aplicada ao sistema, troca-se o conjunto de parâmetros do controlador pelos parâmetros de referência. Ao final do ciclo de auto ajuste os parâmetros são novamente trocados por aqueles correspondentes a perturbações. Assim os mesmos cuidados devem ser tomados neste caso.

#### 3.3.5.2. Mudança suave entre modos

A mudança entre os modos manual e automático deve ser realizada de maneira suave, ou seja, de modo que não provoque uma perturbação indesejável. Assim uma estratégia de transferência entre modos foi implementada. Dois casos foram considerados: transferência de automático para manual ou transferência de manual para automático.

No primeiro caso a ação de controle permanece com o valor igual à média dos últimos valores aplicados. No segundo caso, com o processo em regime permanente (dentro da faixa de ruído), o valor da ação de controle é mantido constante e o valor da referência é feito igual ao valor da última saída.

Por simplicidade, nos dois casos considerados a mudança entre os modos deve ser realizada com o sistema em estado de regime. Entretanto uma estratégia mais elaborada pode ser utilizada, de modo a permitir mudanças entre modos mesmo com o sistema fora da condição de regime[Apolônio 88]. Uma estratégia mais elaborada semelhante pode ser desenvolvida para os casos de mudança de parâmetros do controlador apresentados no item anterior.

#### 3.3.5.3. Atualização da memória do módulo PGA

A utilização do módulo de planejamento do ganho não invalida a propriedade do controlador ser auto-ajustável. O planejamento do ganho é utilizado somente com os parâmetros de perturbação e depende do ponto de operação definido pelo valor da referência. Assim os parâmetros de perturbação armazenados numa tabela de pontos de operação do PGA podem ser comparados com os novos parâmetros calculados pelo auto-ajuste, a cada ciclo de ajuste de parâmetros.

Através da análise dos parâmetros armazenados e calculados, por meio de uma função de avaliação, pode-se determinar se os novos parâmetros adicionam informações à tabela ou proporcionam uma resposta melhor ao sistema. Na hipótese dos novos parâmetros serem escolhidos, a tabela pode ser atualizada.

#### 3.3.6. Módulo do supervisor

O módulo supervisor implementado é constituído de rotinas que, chamadas a partir de pontos estrategicamente escolhidos no "software" do sistema, verificam as condições de operação presentes. Contudo uma versão mais sofisticada de sistema supervisor pode ser realizada através da utilização de um sistema especialista baseado em regras e na definição de um conjunto de variáveis que definam todas as condições necessárias para o conhecimento global do estado do sistema em cada instante de operação.

As seguintes funções são desempenhadas pelo supervisor:

**A) Validação dos parâmetros de malha aberta**

As informações obtidas pelo reconhecimento de malha aberta são comparadas com os valores limites admissíveis previamente definidos na inicialização do sistema. Caso ocorra algum valor fora da faixa permitida, o reconhecimento é cancelado e o operador informado.

**B) Validação dos parâmetros de ajuste inicial**

Após o reconhecimento de malha aberta ser executado com sucesso, os parâmetros iniciais do controlador são calculados. Os valores obtidos são comparados com valores limites permitidos. Caso algum dos limites definidos seja ultrapassado, o ajuste inicial é cancelado e o operador informado.

**C) Validação dos parâmetros de malha fechada**

Após cada reconhecimento de malha fechada, o sistema especialista calcula novos parâmetros de ajuste para o controlador. Novamente, na ocorrência de valores incompatíveis com o sistema, os resultados do ajuste são cancelados, o operador é informado da falha do sistema e o controlador permanece com os parâmetros anteriores.

**D) Verificação do disparo de alarmes**

Limites absolutos definem a faixa de operação de funcionamento do sistema permitida. O sinal de saída nunca pode ser superior ao valor máximo absoluto ou inferior ao valor mínimo absoluto. Caso um destes valores limites seja ultrapassado, o controlador é passado a modo manual, o sinal de controle é colocado num valor seguro adequado e uma mensagem de alarme é informada ao operador de planta.

**E) Detecção de oscilações e instabilidade**

No caso do sistema apresentar oscilações com amplitudes crescentes, o módulo supervisor atuará de modo a baixar o ganho do controlador. Isto é realizado observando-se os quatro primeiros picos da resposta e comparando suas amplitudes relativas. O sistema é passado para o modo de funcionamento automático. O operador é informado e deve observar o sistema. Caso as oscilações persistam, o operador deve passar o controlador para o modo manual e

manualmente colocar o sistema num ponto de operação adequado. Fica a critério do operador retornar o controlador para o modo auto-ajustável novamente.

### 3.3.7. Módulo Gerenciador

O módulo gerenciador coordena as diferentes tarefas durante o funcionamento do controlador. Desta maneira deve conhecer a todo instante o estado corrente do sistema. A existência de diferentes tarefas sugere a utilização de sistemas multi-tarefas.

Uma maneira de implementar este módulo poderia ser a utilização de um núcleo de tempo real semelhante ao sistema ADES [Silva 88]. Este sistema permite que o programa desenvolvido seja organizado segundo diferentes módulos de programa. Cada um destes módulos implementa uma tarefa específica e relaciona-se com os outros através de portas de comunicação. Este tipo de sistema facilita a definição de diferentes camadas de prioridade na execução do código e permite a implementação, por exemplo, de um módulo supervisor independente do código que implementa o controlador e livre da execução seqüencial deste código. Em resumo, este sistema permite uma melhor separação entre as diferentes tarefas em módulos de "software" independentes. Isto facilita a manutenção do sistema como um todo e permite o desenvolvimento de estruturas totalmente independentes.

A utilização de um núcleo de tempo real não é essencial para a implementação do controlador. As tarefas executadas durante o funcionamento do controlador podem ser organizadas razoavelmente de maneira seqüencial. Assim o gerenciador apresenta-se distribuído ao longo do "software", na forma de estruturas localizadas de controle das tarefas a serem executadas. Embora esta solução não seja a mais interessante, ela satisfaz as necessidades básicas de implementação do controlador.

No caso do controlador implementado as tarefas são executadas de maneira seqüencial e interrompidas a cada período de amostragem por uma rotina de interrupção responsável pela aquisição de dados, atualização da tela e aplicação do sinal de controle. O gerenciador observa constantemente a interface homem/máquina, a fim de reconhecer qualquer informação proveniente do operador. Caso uma informação seja fornecida pelo operador, o gerenciador traduz a informação e coordena a execução das tarefas necessárias.

### 3.3.8. Módulo de interface homem/máquina

Este módulo permite que o operador se comunique com o controlador. O controlador desenvolvido incorpora muitas das atividades normalmente desempenhadas pelo operador de planta. Assim o operador passa a desempenhar um papel de supervisor de nível mais elevado.

Todas as informações relevantes para o conhecimento do estado corrente do sistema ficam disponíveis através esta interface, que apresenta duas funções básicas : fornecer informações para o operador de planta e permitir que o operador atue sobre o funcionamento do controlador. Este módulo implementa todas as especificações apresentadas no item 3.2.3.

No sistema implementado as informações ficam disponíveis para o operador através de um monitor de vídeo. A tela encontra-se dividida em quatro campos : um para apresentação dos gráficos das variáveis controlada e de controle (1), um para visualização dos valores das variáveis (2), um para visualização da entrada de informações via teclado e apresentação de mensagens (3) e outro com a definição das teclas de função conforme o estado corrente do controlador (4) (Fig. 3.6).

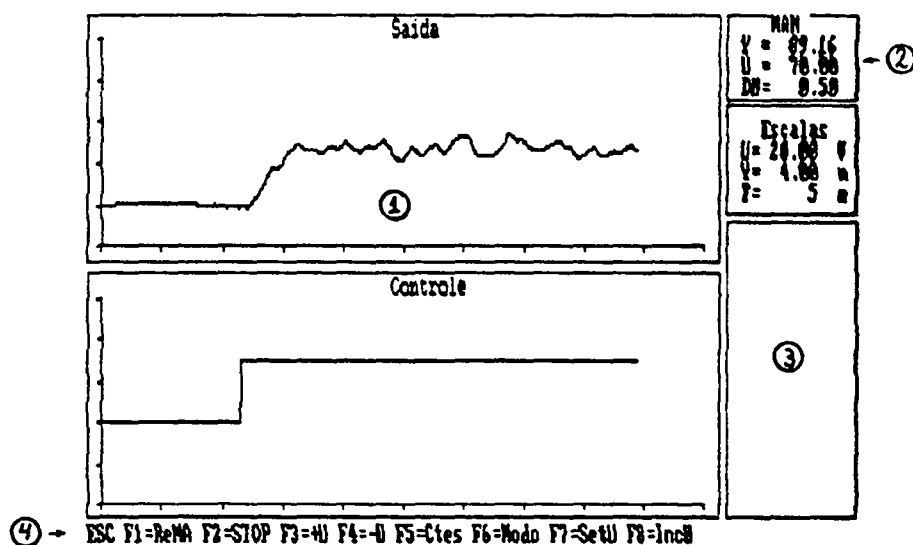


Fig. 3.6 - Tela de monitoração do sistema

No caso do controlador definitivo, pode-se implementar a interface homem/máquina através de um painel frontal no próprio equipamento. Através de comunicação serial, o equipamento pode ser conectado a um terminal de vídeo inteligente, a um computador central de supervisão ou a um sistema digital de controle distribuído (SDCD).



As funções que o operador pode executar dependem do contexto atual do funcionamento do controlador. Conforme o modo de funcionamento ou a tarefa sendo executada o operador interage de diferentes maneiras. O operador pode a qualquer momento interromper a execução de uma tarefa.

A configuração inicial do controlador pode ser realizada através deste módulo. A configuração possibilita que alguns parâmetros sejam definidos conforme a aplicação, antes do controlador iniciar seu funcionamento. Dentre os parâmetros programados pode-se citar: níveis de alarme, valores limites máximos dos parâmetros do controlador, tempo de amostragem, especificações de controle, quantidade de pontos para armazenamento de respostas, tempo de reconhecimento da faixa de ruído, etc...

### 3.4. Descrição do protótipo implementado

O controlador foi implementado em um computador compatível com um IBM-PC, com 640KBytes de memória, frequência de operação de 4.77 MHz e monitor monocromático CGA. O sistema operacional utilizado foi o MS-DOS versão 3.3. Para aquisição de dados dos processos foi utilizada uma placa de conversão AD/DA da marca TAURUS, com 10 bits (dez bits) de resolução e taxa de conversão de 4KHz.

Utilizou-se a linguagem de programação "C", para isto foi usado o compilador MS-C versão 6.0. O sistema foi todo implementado na forma de blocos funcionais independentes, a fim de facilitar a manutenção e o desenvolvimento.

O sistema é executado de maneira seqüencial e utiliza apenas um nível de interrupção. Esta interrupção é produzida a cada período de amostragem e é gerada através da programação de contadores existentes na placa de aquisição de dados. Assim, a cada período de amostragem o valor da variável controlada é lido do conversor A/D, o valor da ação de controle é calculado e aplicado ao processo através do conversor D/A. Durante a execução da rotina de interrupção a tela de apresentação é atualizada. O período de amostragem pode ser programado a partir de um valor mínimo de 50 ms(frequência máxima de amostragem).

O operador interage com o sistema através do teclado e do monitor de vídeo. Durante a execução do sistema pode-se gravar em disco os gráficos do sinal de saída e sinal de controle.

### 3.5. Considerações para implementação de um protótipo de controlador PID-AA industrial.

A experiência adquirida durante o trabalho realizado possibilitou o desenvolvimento de uma percepção crítica sobre as características do controlador PID-AA. Desta maneira espera-se neste item fornecer subsídios concretos, a fim de viabilizar a implementação de um primeiro protótipo industrial para o controlador desenvolvido.

A implementação do controlador consiste em duas partes bem distintas : "hardware" e "software". Desta forma a discussão que se segue foi dividida segundo estas duas partes básicas. Inicialmente serão realizadas considerações sobre o "software" desenvolvido, pois este apresenta características particulares que podem condicionar as especificações do "hardware".

#### 3.5.1. Considerações sobre o "software"

A implementação do "software" do controlador deve ser baseada numa linguagem de alto nível, mas que disponha de facilidades para a elaboração de rotinas de baixo nível. A linguagem escolhida deve possuir boa performance quanto a tempo de execução e ocupar pouca quantidade de memória. Desta maneira sugere-se a linguagem de programação "C", que além de possuir todas estas características, tem boa portabilidade entre diferentes máquinas e encontra-se bastante padronizada (padrão ANSI).

Outra possibilidade é a utilização de "C++", que aplica os conceitos das linguagens orientadas a objeto, permitindo o encapsulamento de funções e melhorando a organização do sistema. Isto é interessante, a fim de facilitar a manutenção e atualização do "software". Entretanto esta segunda alternativa pode resultar num tamanho de código executável mais extenso.

O sistema de regras é traduzido pelo sistema SPP para a linguagem "C".  
 Embora este artifício melhore a performance de execução da base de regras do sistema especialista, ele cria um código executável muito extenso. De fato, se um atributo aparecer, por exemplo, na parte de premissa e de conclusão de um conjunto grande de regras, pode ocorrer uma explosão combinatória [Paladino 91].

Entretanto foi detectado que existe uma forte componente procedural na implementação da base de regras. Isto sugere que a implementação do módulo do sistema especialista (SE) definitivo pode ser realizada através do modelo

procedural tradicional. A versão final deve ainda ser otimizada, a fim de diminuir a quantidade de memória ocupada por este módulo.

O controlador implementado resultou num código executável com cerca de 540 KBytes, dos quais cerca de 340KBytes constituem o sistema de regras (60%). Este tamanho elevado deveu-se basicamente ao código gerado pelo módulo do SE. Como foi discutido nos parágrafos anteriores, o SPP otimiza o tempo de execução, mas gera código extenso. Apesar disto, para a etapa de desenvolvimento e teste de novas regras, ainda é interessante a utilização do sistema original baseado em regras, devido a facilidade de construção das regras e clareza de apresentação para o especialista.

No caso da utilização do controlador de modo dedicado, a base de regras pode ser simplificada, a fim de conter apenas àquelas regras realmente significativas para a aplicação específica de interesse. Desta maneira o tamanho do código executável pode ser diminuído e a capacidade de memória reduzida.

### 3.5.2. Considerações sobre o "hardware"

Uma parte muito importante na implementação do controlador está relacionada com a industrialização do equipamento final e a engenharia industrial envolvida neste processo. Entretanto estes aspectos da implementação não serão aqui tratados, uma vez que são bem conhecidos pelos fabricantes de controladores industriais. Desta maneira procurar-se-á abordar apenas aspectos relacionados às necessidades de "hardware" impostas pelo controlador desenvolvido. Neste sentido três estruturas diferentes são apresentadas: controlador "single-loop", sistema multi-malhas e sensores inteligentes.

#### 3.5.2.1. Controlador "single-loop"

Esta primeira estrutura consiste no desenvolvimento de um equipamento destinado a uma única malha de controle. Cada unidade possui um microcontrolador dedicado, de modo a permitir a operação de forma autónoma completamente independente. Este tipo de estrutura corresponde àquela da maioria dos controladores atualmente disponíveis no mercado, que contudo não possuem as características adaptativas apresentadas nos capítulos anteriores.

No caso da utilização deste tipo de estrutura numa planta industrial, diversos controladores podem ser ligados a um computador central, através de

interfaces de comunicação serial ou de barramentos de campo ("field-bus"). Desta maneira o computador central pode atuar como uma estação de supervisão geral do sistema(Fig. 3.7).

Considerando-se a grande disponibilidade de produtos da linha INTEL no país, sugere-se a utilização de microprocessadores deste fabricante. Dentre os diferentes microprocessadores existentes, o microcontrolador 8096, analisando-se suas características, parece ser o mais indicado para a implementação do controlador neste tipo de estrutura.

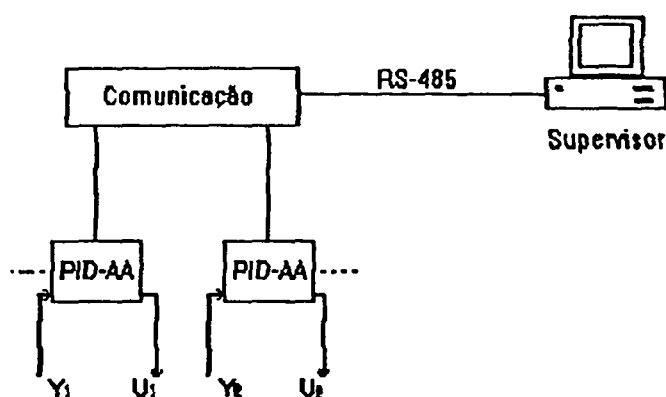


Fig. 3.7 - Controladores "single-loop" ligados a estação de supervisão central.

Ao contrário dos microprocessadores, os microcontroladores são otimizados para aplicações específicas. O 8096 é um microcontrolador de 16 bits e foi projetado para apresentar alta performance em aplicações de controle. Este microcontrolador possui um sistema de entradas e saídas (I/O) dedicado e um conjunto de 16 instruções aritméticas, incluindo multiplicação e divisão.

Além de constituir-se num componente de custo reduzido, o 8096 possui todos os elementos necessários para implementação do controlador desenvolvido. Desta forma, num único circuito integrado (CI), encontra-se disponível:

- \* CPU de 16 bits
- \* conversor analógico/digital de 10 bits de resolução, com até 8 entradas multiplexadas
- \* gerador de pulsos PWM
- \* "watchdog timer"

- \* porta serial com gerador de "baud rate" independente e 4 modos de funcionamento (mecanismos de comunicação em rede)
- \* dois contadores de 16 bits : um "timer" e um contador de eventos externos
- \* 4 detectores programáveis sensíveis a transição de nível
- \* 8 vetores de interrupção
- \* 5 portas de entrada/saída de 8 bits
- \* 6 saídas e 4 entradas de alta velocidade (HSIO)

A principal limitação deste microcontrolador é sua capacidade limitada de endereçamento, resultante da existência de apenas 16 bits de endereço. Isto faz com que o 8096 seja capaz de acessar diretamente somente 64 Kbytes. Portanto o tamanho dos programas aplicativos, a princípio, ficam limitados a 64 Kbytes. Entretanto este problema pode ser contornado através do mapeamento de memória, a fim de expandir o tamanho da memória disponível.

O mapeamento de memória consiste em utilizar algumas saída de I/O do microcontrolador, a fim de aumentar o número de bits da palavra de endereçamento (Fig. 3.8). Assim a capacidade da memória pode ser expandida até um total de 544Kbytes, através da utilização da porta de I/O número 1. Este artifício contorna o problema de endereçamento limitado, mas torna a implementação do "software" bem mais complexa.

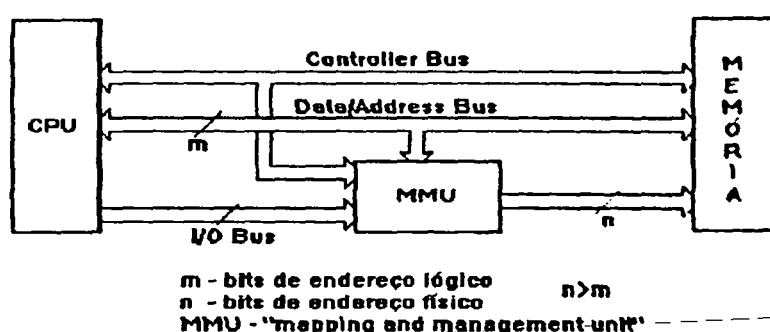


Fig. 3.8 - Mapeamento de memória no 8096

A implementação da memória necessária pode ser realizada através de memórias do tipo "FLASH". Esta nova tecnologia substitui a tradicional utilização de memórias do tipo EPROM (apagamento do conteúdo por luz) e EEPROM (apagamento por sinal elétrico), que apresentam inconvenientes na atualização do conteúdo armazenado. As memórias tipo "FLASH" funcionam semelhantemente às

memórias do tipo RAM, mas retêm as informações mesmo na ausência de alimentação. Estas memórias apresentam um custo menor que o das EEPROM e possuem um elevado grau de integração, uma vez que capacidades de 1 Mbyte (1 Mbyte x 8) num único CI já são disponíveis comercialmente.

Embora o circuito integrado do 8096 não possua um conversor digital/analógico, o gerador de pulso PWM pode ser utilizado para este fim, através da utilização de um circuito complementar externo simples. Entretanto o conversor resultante possui apenas 8 bits de resolução. Desta maneira pode-se prever espaço físico na placa de circuito impresso do controlador, de modo a possibilitar a utilização de um conversor de maior resolução, quando este se fizer indispensável.

O equipamento final deve conter ainda um painel frontal, contendo teclas com funções básicas (a combinação de teclas deve possibilitar implementar um número maior de funções), mostradores digitais e um conector tipo DB-25. Este conector deve permitir a comunicação do controlador com um terminal de bolso, a fim de possibilitar a realização da configuração inicial ou a alteração de parâmetros de projeto do controlador armazenados na memória.

Finalmente, sugere-se a utilização de uma fonte de alimentação do tipo chaveada, que além de apresentar um rendimento maior (menos perdas), possui dimensões bastante menores que as fontes lineares convencionais. A utilização dos componentes sugeridos deve resultar num equipamento eficiente, de dimensões bastante reduzidas e de baixo custo.

### 3.5.2.2. Sistema multi-malhas

Muitas indústrias já possuem sistemas do tipo SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), que consistem basicamente na utilização de um computador central que atua como supervisor da planta. Através deste computador os diversos parâmetros e variáveis da planta podem ser observados e ter seus valores modificados pelo operador. Estes sistemas normalmente utilizam os controladores clássicos do tipo PID.

As técnicas de ajuste automático e auto-ajuste desenvolvidas para o PID-AA podem ser utilizadas nos sistemas SDCD tradicionais. Contudo o "software" básico destes sistemas precisa ser reestruturado ou revisto, a fim de permitir a implementação do mecanismo adaptativo do PID-AA para cada controlador da

planta. Desta maneira pode-se aproveitar o "hardware" já existente nos SDCD (computador central e controladores instalados na planta), a fim de implementar o PID-AA.(Fig. 3.9)

A implementação num SDCD como sugere-se no parágrafo anterior, necessita que para cada controlador da planta sejam executadas tanto as rotinas de reconhecimento quanto as rotinas de auto-ajuste. Assim o computador central além de funcionar como supervisor da planta, passa a atuar como executor do mecanismo adaptativo de cada controlador. Para isto o computador central necessita monitorar a resposta de cada controlador e atualizar os parâmetros dos controladores após cada ciclo de auto-ajuste individual.

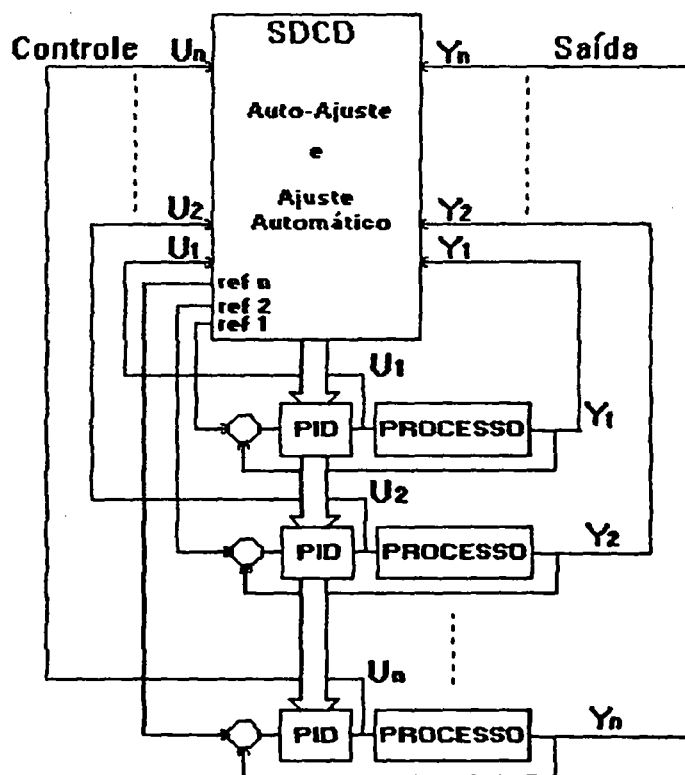


Fig. 3.9 - SDCD com mecanismo adaptativo

Assim pode-se utilizar a mesma estrutura básica de "hardware" de um SDCD. Entretanto é interessante que o processador utilizado forneça facilidades para a elaboração de um núcleo de tempo real, a fim de permitir a implementação de um sistema de "software" multi-tarefas.

A implementação de um núcleo de tempo real não impõe condições estritas sobre o microprocessador utilizado, mas pode ser bastante simplificada pela

escolha de um microprocessador que já apresente mecanismos de controle de tarefas. Desta maneira poder-se-ia utilizar o 8086. Entretanto microprocessadores mais sofisticados como 80286 ou 80386 facilitam a implementação e permitem adicionar outras características ao núcleo de tempo real.

### 3.5.2.3. Sensores Inteligentes

O grande desenvolvimento da microeletrônica possibilita a implementação de equipamentos cada vez mais poderosos e de tamanho reduzido. Isto propiciou o surgimento de uma nova concepção de sensores para processos industriais, designados por "sensores inteligentes".

Estes sensores caracterizam-se por combinar em um único equipamento, o sensor de aquisição de informações da planta com o algoritmo de controle (Apêndice E). Isto dispensa a necessidade de utilização dos tradicionais painéis de controle a nível de chão de fábrica. Desta maneira evita-se a transmissão de sinais analógicos entre os sensores e o controlador, que no meio industrial torna-se muito sujeita aos efeitos nocivos do ruído. A comunicação entre a sala de controle e cada um dos controladores existentes na planta, pode ser realizada através de interfaces seriais ou "loop" de corrente. Futuramente poder-se-á utilizar fibras óticas, que são completamente imunes a ruídos eletromagnéticos.

Portanto pode-se utilizar o PID-AA como algoritmo de controle de um sensor inteligente. Para isto o sistema de regras pode ser simplificado, conforme o tipo de aplicação, a fim de resultar num programa executável final de código reduzido e de aplicação dedicada. Estes sensores podem ser implementados utilizando-se o mesmo "hardware" sugerido para a aplicação "single-loop".

## 3.6. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi implementar um protótipo de laboratório para o controlador desenvolvido. A implementação deste primeiro protótipo foi de fundamental importância, a fim de possibilitar o estudo do comportamento do controlador em situações reais de funcionamento, ou seja, fora de um ambiente de simulação. Isto permitiu uma primeira avaliação concreta da viabilidade de utilização do controlador em processos industriais.

Estudos no sentido de tornar o controlador totalmente automático estão sendo realizados e a implementação de um ambiente de desenvolvimento de



controladores adaptativos baseado em estações de trabalho [Kammer 92], atualmente em curso, facilitará de modo considerável o aperfeiçoamento do atual sistema.

Os mecanismos de transferência suave entre modos e entre os dois conjuntos de parâmetros funcionam satisfatoriamente. Entretanto é interessante o desenvolvimento de mecanismos mais elaborados, a fim de garantir o funcionamento correto sobre quaisquer condições, inclusive fora da condição de regime (permanência na FR) [Apolônio 88].

A utilização de um núcleo de tempo real deve facilitar a organização das tarefas pelo módulo gerenciador, além de propiciar a implementação de um módulo supervisor mais sofisticado e poderoso. Entretanto deve-se considerar o custo econômico e em termos de capacidade de memória, decorrentes da implementação deste núcleo de tempo real.

A próxima etapa no desenvolvimento deste controlador é, sem dúvida, a implementação de um protótipo industrial, a fim de possibilitar uma avaliação mais precisa do controlador, operando num ambiente fabril real. Isto também propiciará o levantamento dos custos de fabricação deste equipamento.

## Capítulo IV

### O método de regressão por partes desenvolvido

#### 4.1. Introdução

No capítulo anterior foi descrito o controlador desenvolvido. A arquitetura utilizada e seus diferentes módulos foram apresentados. O problema da existência do ruído foi discutido e um primeiro resultado da utilização do método desenvolvido foi apresentado.

Neste capítulo será descrito o método desenvolvido. Embora este método ainda necessite de estudos mais aprofundados, os resultados obtidos indicam ser o caminho escolhido uma boa alternativa para contornar os efeitos nocivos da existência de ruído nos sinais adquiridos de uma planta industrial.

Será analisada a importância dos parâmetros utilizados para definição do método desenvolvido através da apresentação de diferentes resultados. O problema da determinação do número de pontos para cada regressão será discutido e uma primeira solução para este será apresentada. Uma estratégia para contornar este problema será também discutida .

#### 4.2. Técnicas de estimação

O controlador PID-AA é baseado no reconhecimento das formas de onda de resposta do sistema. Contudo a existência de ruído no sinal modifica a forma de onda de resposta do sistema. Desta maneira, para que o reconhecimento das formas de onda forneça resultados corretos, é necessário eliminar ou contornar de algum modo o efeito negativo provocado pelo ruído presente no sinal proveniente do sistema a ser controlado.

Embora não seja possível eliminar o ruído presente no sinal, pode-se estimar o sinal original através de técnicas adequadas. Desta maneira recupera-se a forma de onda original do sinal, ou seja, a forma de onda caso não existisse o ruído.

Basicamente são três as possibilidades para estimar o sinal original : suavização da curva, filtragem e predição. A figura abaixo (Fig. 4.1) [Åström 84] ilustra o conceito relacionado a cada uma destas técnicas. Para a suavização da curva num dado ponto, necessita-se conhecer pontos anteriores e posteriores ao

instante correspondente ao ponto de interesse. A filtragem utiliza informações dos pontos anteriores e do ponto atual. A predição utiliza somente pontos anteriores, a fim de estimar um dado ponto de interesse.

No caso do controlador PID-AA, combina-se a técnica de suavização de curvas com a filtragem. A suavização de curvas é implementada através do método que será descrito neste capítulo, enquanto a filtragem é implementada por um filtro passa-baixa analógico colocado antes do conversor analógico/digital.

A filtragem do sinal elimina grande parte do ruído presente, mas a forma de onda do sinal (resposta do sistema no tempo) ainda apresenta pequenas irregularidades. Isto dificulta a implementação de rotinas de reconhecimento no computador que identifiquem adequadamente pontos de máximos e mínimos locais. Por este motivo a rotina de suavização foi desenvolvida. É importante ressaltar que teve-se sempre em mente o desenvolvimento de um método simples e eficaz, evitando-se portanto métodos que implicassem em grande quantidade de cálculos, de modo a não sobrecarregar o processador.

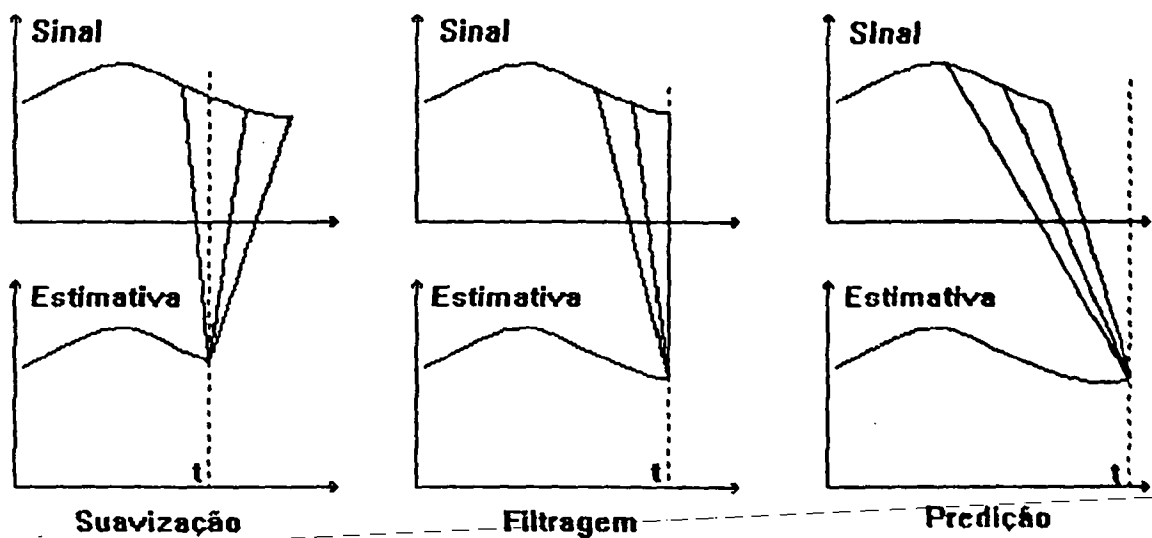


Fig. 4.1 - Técnicas de estimação da resposta

As técnicas de predição normalmente necessitam de informações adicionais sobre o sistema, como por exemplo, o modelo ou a ordem do sistema. Portanto para poderem ser utilizadas precisam de conhecimentos "a priori" sobre o sistema, o que é contraditório com a filosofia do controlador que foi desenvolvido.

### 4.3. Descrição do método desenvolvido

O método de regressão por partes consiste em dividir a curva de resposta do sistema, corrompida por ruído, em um número pré-definido de intervalos. A cada um destes intervalos é aplicada uma regressão polinomial de segundo grau.

Cada intervalo, nos quais a curva de resposta foi dividida, apresenta o mesmo número de pontos e sobre estes pontos é aplicada a técnica de regressão linear utilizando uma curva de ajuste polinomial de 2ª ordem. Para garantir que a curva de ajuste resultante (combinação de todas as regressões realizadas para cada intervalo) seja contínua e não apresente pontos de quebra as seguintes condições são impostas:

$$P_i(x_{p_i}) = P_{i-1}(x_{p_i}) \quad (4.1)$$

$$\dot{P}_i(x_{p_i}) = \dot{P}_{i-1}(x_{p_i}) \quad (4.2)$$

onde:

$P_i(x) = a_{2i} x^2 + a_{1i} x + a_{0i}$  polinômio resultante da regressão no i-ésimo intervalo

$$\dot{P}_i(x) = dP_i/dx$$

$x_{p_i}$  ponto que define a interseção entre dois intervalos de regressão consecutivos

$$i = 0, 1, \dots, N$$

$$N = n^0 \text{ de intervalos}$$

As condições anteriores, apesar de necessárias, fazem com que as regressões calculadas para cada intervalo dependam da regressão anterior. Assim existe o problema de propagação de erros da regressão de um intervalo para as regressões dos intervalos posteriores a este. Além disto, a condição de continuidade sobre a derivada no ponto de interseção constitui-se, na prática, numa condição muito forte, no sentido de que um único ponto define como será realizada a regressão no próximo intervalo a ser considerado. Cada intervalo foi dividido em duas partes iguais, a fim de solucionar estes problemas.

Todos os pontos do intervalo contribuem para o cálculo do polinômio regressor, mas somente a primeira metade dos pontos do intervalo tem seus valores correspondentes ajustados pela regressão. A segunda metade de pontos

do intervalo é utilizada para determinar a tendência da curva. O ponto de interseção  $x_p$  passa a ser o ponto médio de cada intervalo considerado. A regressão é aplicada a intervalos de pontos iguais ao intervalo de pontos em que a curva original foi particionada, mas o ajuste dos pontos é realizado em intervalos correspondentes à metade dos intervalos de partição.

Em resumo, os intervalos da partição original da curva são modificados de modo que a segunda metade de pontos de um intervalo corresponda a primeira metade de pontos do intervalo imediatamente consecutivo (Fig. 4.2).

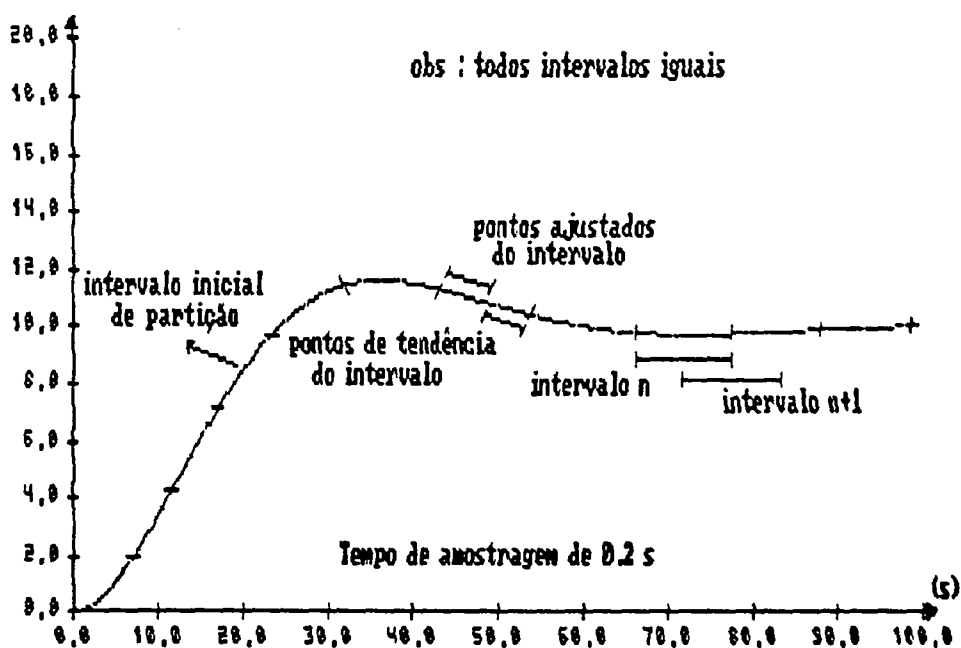


Fig. 4.2 - Partição dos intervalos de regressão.

#### 4.4. Equacionamento matemático do método desenvolvido.

Seja o conjunto de pontos de coordenadas  $[x_j, y_j]$  e  $j=1, \dots, M$ , onde  $M$  é o número de pontos do intervalo. Deseja-se encontrar o valor dos parâmetros  $(a_{2j}, a_{1j}, a_{0j})$  de modo que a soma do quadrado dos resíduos definida por:

$$S = \sum_{j=1}^M [y_j - (a_{2j} x_j^2 + a_{1j} x_j + a_{0j})]^2 \quad (4.3)$$

seja mínima.

Define-se  $x_{pi} = x_m$  como o ponto de interseção dos dois intervalos. Desta forma utilizando as condições (4.1) e (4.2), temos que:

$$a_{2i} x_{pi}^2 + a_{1i} x_{pi} + a_{0i} = P_{i-1}(x_{pi})$$

$$\Rightarrow a_{0i} = P_{i-1}(x_{pi}) - (a_{2i} x_{pi}^2 + a_{1i} x_{pi})$$

$$2a_{2i} x_{pi} + a_{1i} = \dot{P}_{i-1}(x_{pi})$$

$$\Rightarrow a_{1i} = \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) - 2a_{2i} x_{pi}$$

Substituindo na equação da somatória dos resíduos, temos:

$$S = \sum_{j=1}^m R_j^2 \quad (4.4)$$

onde :

$$R_j = [y_j - a_{2i} x_j^2 - (\dot{P}_{i-1}(x_{pi}) - 2a_{2i} x_{pi}) x_j - (P_{i-1}(x_{pi}) - a_{2i} x_{pi}^2 - a_{1i} x_{pi})]^2$$

Para minimizar a somatória devemos encontrar  $a_{2i}$  tal que:

$$dS/da_2 = 2 \{R_j (-x_j^2 + 2 x_{pi} x_j - x_{pi}^2)\} = 0$$

Definindo:

$$\begin{aligned} K_1 &= \sum x_j^2 y - 2 x_{pi} \sum x_j y + x_{pi}^2 \sum y - \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) \sum x_j^3 + \\ &+ 2 \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) x_{pi} \sum x_j^2 - \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) x_{pi}^2 \sum x_j - \\ &- P_{i-1}(x_{pi}) \sum x_j^2 + 2 P_{i-1}(x_{pi}) x_{pi} \sum x_j - P_{i-1}(x_{pi}) x_{pi}^2 m + \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) x_{pi} \sum x_j^2 - 2 \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) x_{pi}^2 \sum x_j + \\ &+ m \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) x_{pi}^3 \\ K_2 &= \sum x_j^4 - 4 x_{pi} \sum x_j^3 + 6 x_{pi}^2 \sum x_j^2 - 4 x_{pi}^3 \sum x_j + m x_{pi}^4 \end{aligned}$$

obtem-se :

$$a_{2i} = K_1/K_2$$

$$a_{2i} = K_1/K_2$$

$$a_{1i} = \dot{P}_{i-1}(x_{pi}) - 2 a_{2i} x_{pi}$$

$$a_{0i} = P_{i-1}(x_{pi}) - (a_{2i} x_{pi}^2 + a_{1i} x_{pi})$$

#### 4.5. Análise da aplicação do método desenvolvido

A análise realizada neste item consistirá em apresentar, através de resultados da aplicação do método, o efeito provocado pelos diferentes parâmetros que definem o comportamento da curva ajustada resultante. Salienta-se que a análise foi realizada considerando-se o sistema sem o filtro analógico. Desta maneira, a utilização do filtro deve fornecer resultados ainda melhores. Todos os gráficos possuem escala de tempo em segundos e salvo informação em contrário o tempo de amostragem foi igual a 0.2s.

##### 4.5.1. Efeito do número de pontos de um intervalo (M)

O valor do número de pontos que define o tamanho de cada intervalo de regressão (M) condiciona a qualidade de ajuste da resposta do sistema pelo método desenvolvido. As figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram o comportamento do ajuste realizado conforme o valor do número M é escolhido. A amplitude de ruído máximo foi fixada em 10 % do valor da mudança de referência.

Na figura 4.3 a escolha correta deste número (M=30) fornece um excelente resultado. Na figura 4.4 onde M=70 (quantidade de pontos escolhida excessiva) o resultado do ajuste apresenta um leve deslocamento em relação a posição correta da curva de ajuste ótima. Assim a medida que o número M aumenta em relação a seu valor ótimo, a qualidade do ajuste piora e a partir de um determinado valor, a curva ajustada deixa de representar satisfatoriamente a curva de resposta do sistema.

A situação oposta, ou seja, para um valor de M menor do que o valor ótimo o efeito da diminuição da quantidade de pontos é fazer com que a curva ajustada torne-se mais sensível ao valor da amplitude do ruído presente. Esta maior sensibilidade faz com que a curva ajustada comece a apresentar pequenas irregularidades semelhantemente a "dentes de serra". O efeito resultante desta situação pode ser observado na figura 4.5(M=10).

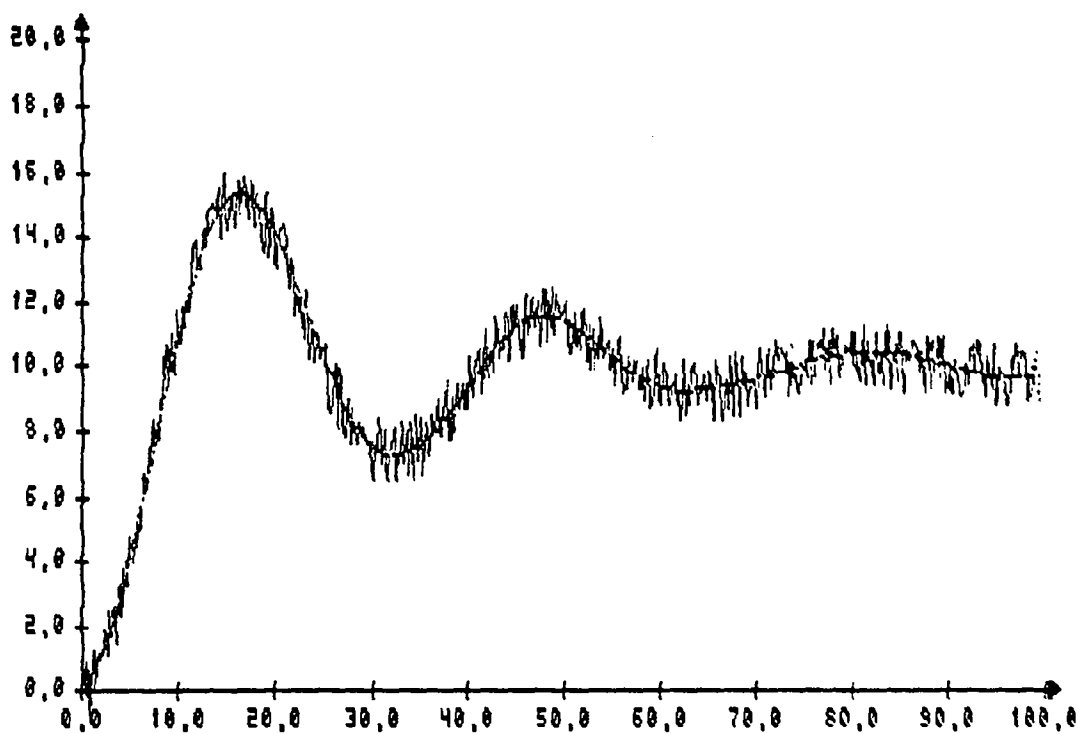


Fig. 4.3 - Resultado do ajuste correto

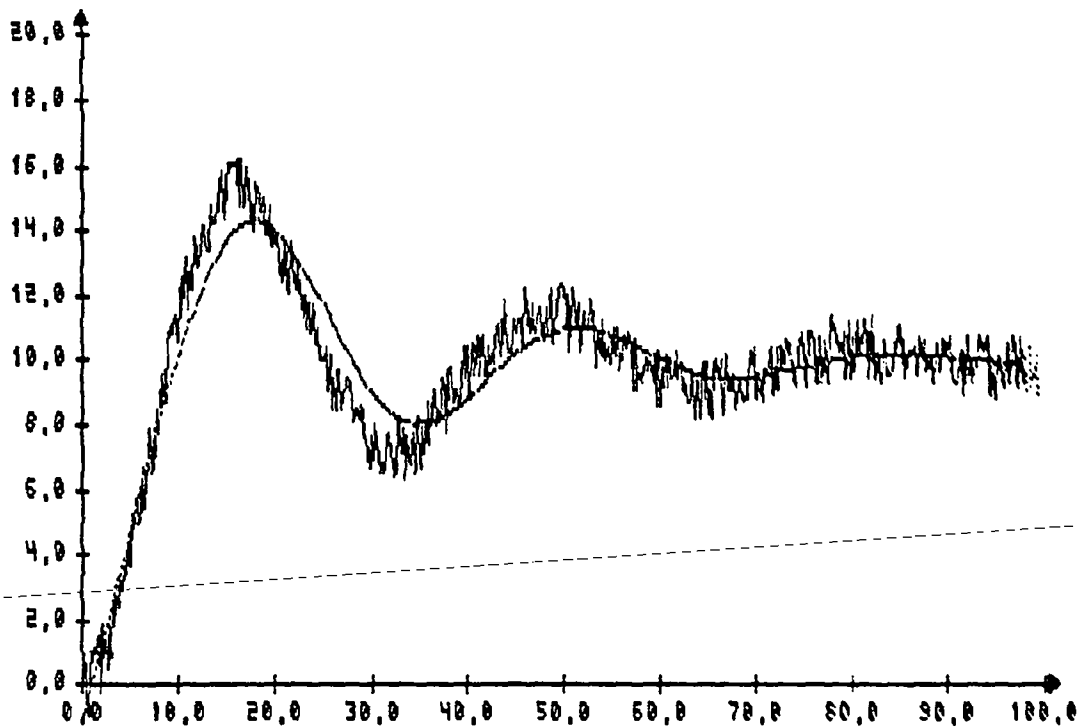


Fig. 4.4 - Efeito do número excessivo de pontos



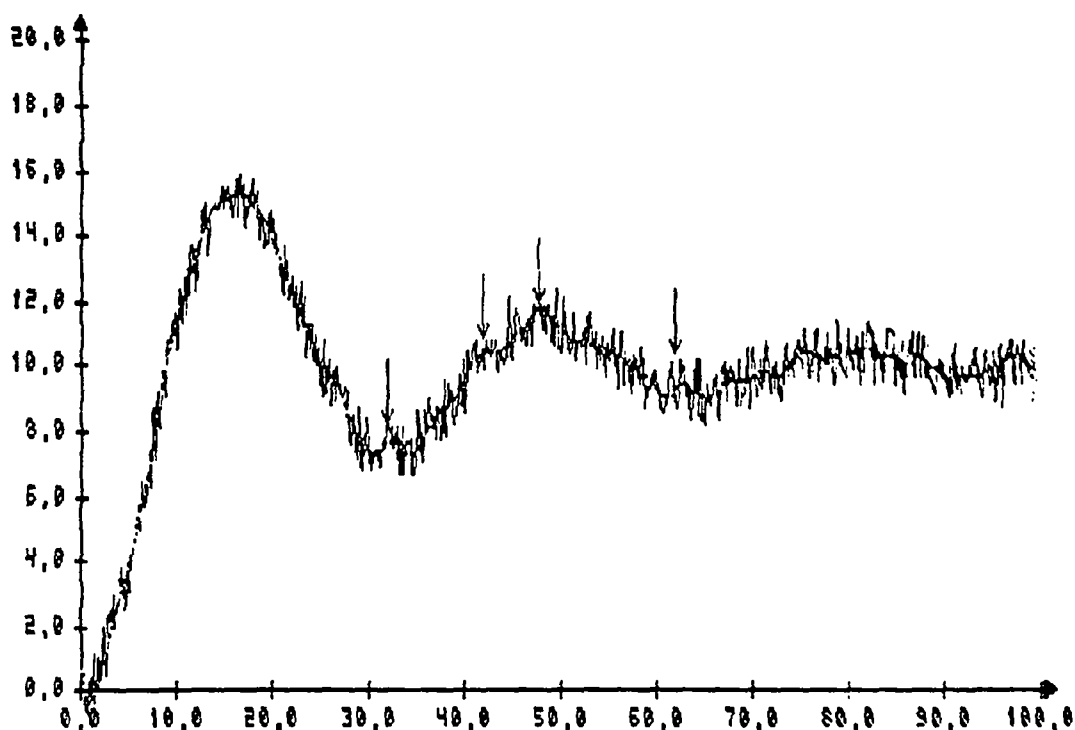


Fig. 4.5 – Efeito do número reduzido de pontos

#### 4.5.2. Efeito da amplitude do ruído

O valor da amplitude do ruído presente no sinal também interfere indiretamente na qualidade do resultado obtido. Intuitivamente pode-se afirmar que quanto menor o valor desta amplitude, melhor o resultado e realmente isto verifica-se na prática. Outro fator que interfere no resultado é o espectro de frequências do ruído. Antes que o sinal do sensor seja amplificado e passado através do conversor A/D, o sinal é passado por um filtro passa-baixa.

Apesar destes cuidados serem tomados, abaixo são apresentados alguns resultados obtidos para diferentes amplitudes de ruído que demonstram a potencialidade de aplicação do método desenvolvido, mesmo no caso da inexistência do filtro analógico. As figuras 4.6, 4.7 e 4.8 ilustram o efeito de diferentes amplitudes de ruído. O ruído é gerado através de uma rotina de "software" e seu efeito é adicionar uma amplitude de valor aleatório ao sinal do sistema. A amplitude mencionada nos gráficos refere-se ao valor máximo atingido pelo ruído produzido. Observando os resultados do efeito da amplitude do ruído, notamos que quanto menor a amplitude, melhor a qualidade da curva ajustada. Além disto percebe-se que a escolha de um valor menor para o número M, neste caso, melhora também o ajuste.

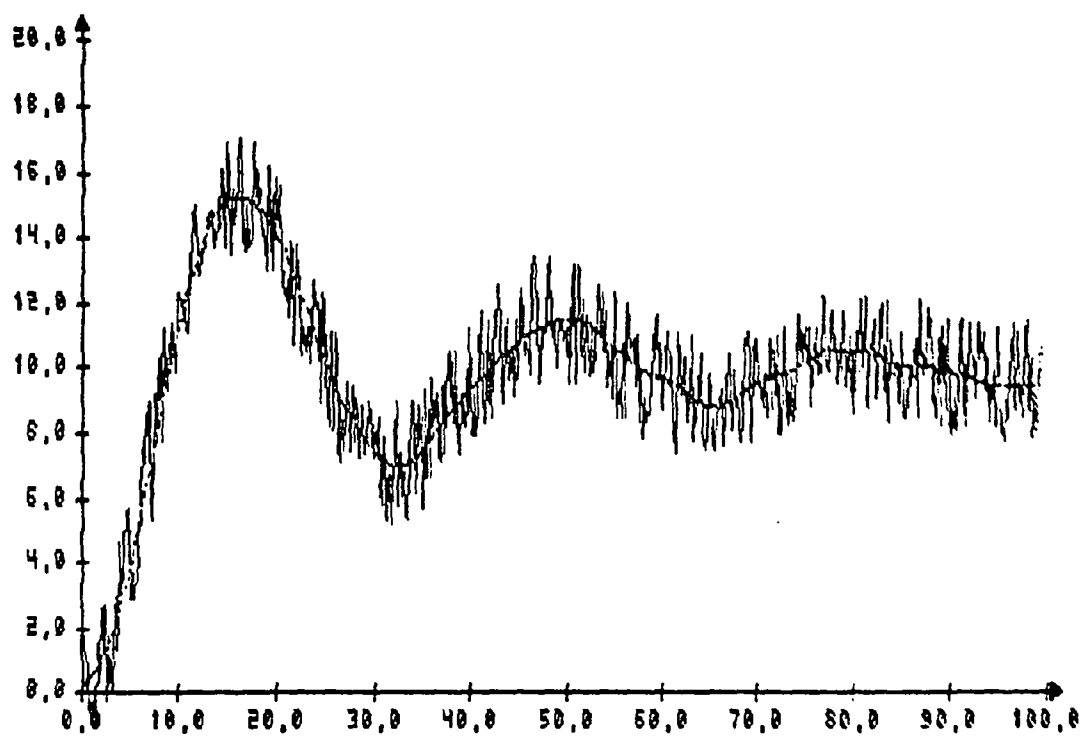


Fig. 4.6 - Amplitude do ruído de 0.2 V

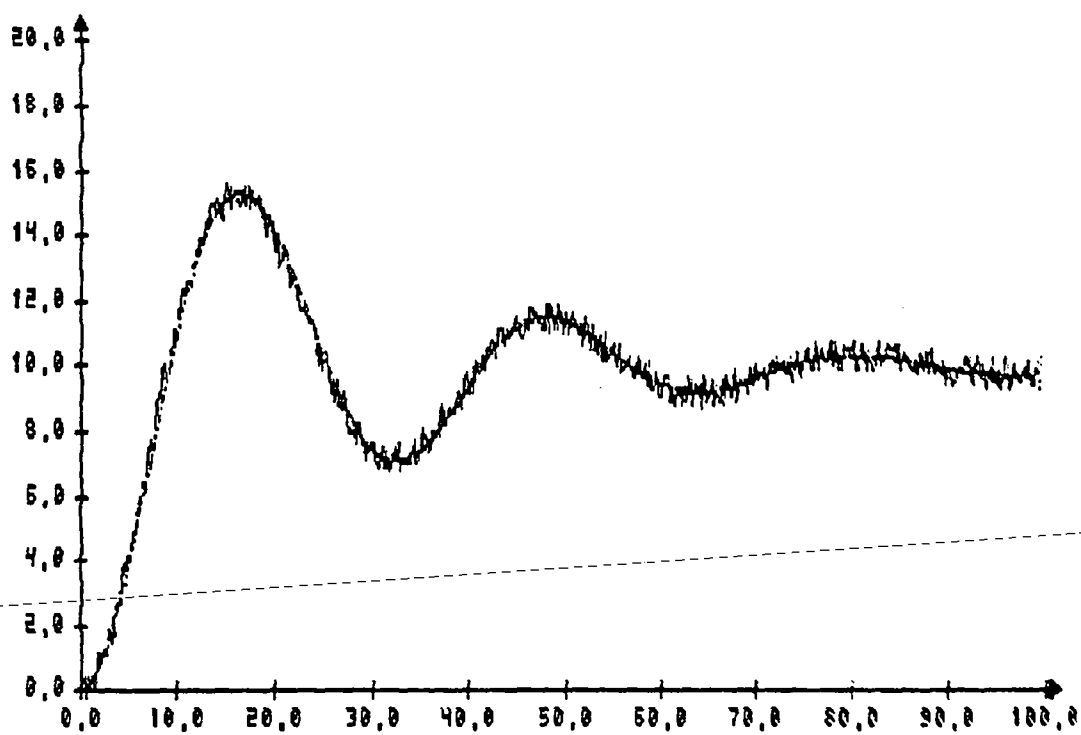


Fig. 4.7 - Amplitude do ruído de 0.05 V

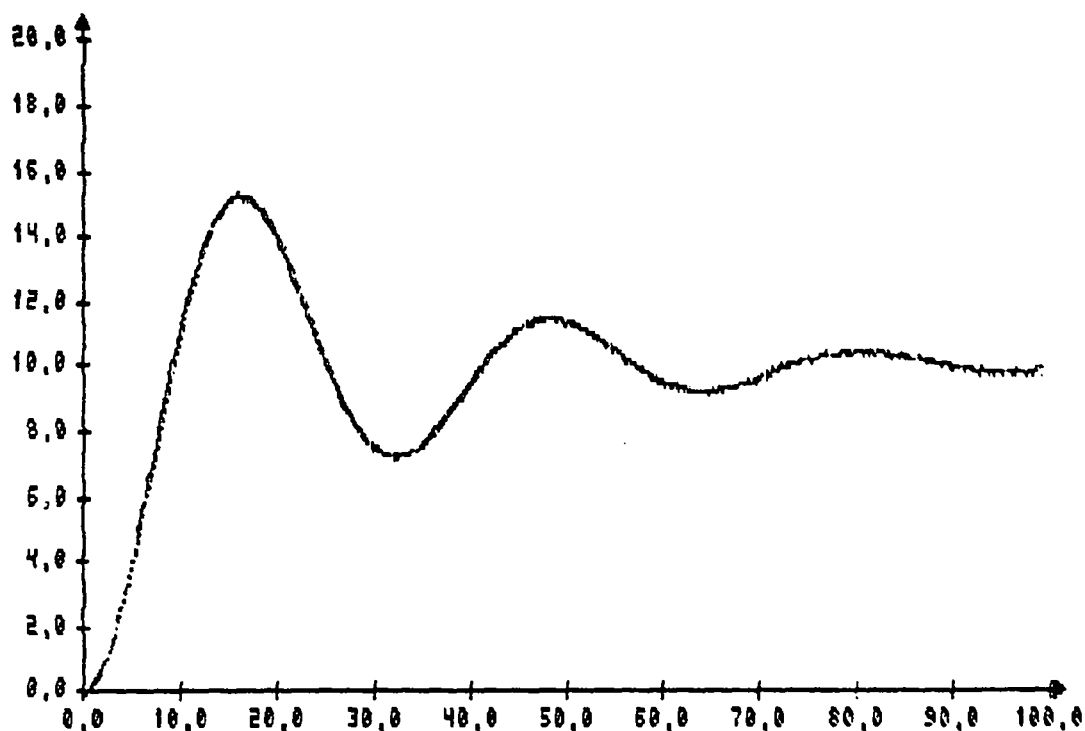


Fig. 4.8 - Amplitude do ruído de 0.01 V

#### 4.5.3. Efeito da frequência de amostragem

A frequência de amostragem, que define diretamente o espaçamento no tempo entre os pontos da resposta do sistema, tem influência também no desempenho do método. Quanto maior a frequência de amostragem, conseqüentemente quanto mais próximos estão os pontos, melhor o ajuste resultante. O valor ótimo de  $M$  tende a aumentar a medida que a frequência de amostragem aumenta. As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 ilustram o comportamento do método para diferentes períodos de amostragem de 0.2, 0.5 e 0.8 segundos respectivamente. Tudo se passa como se o valor de  $M$  fosse aumentado, mantendo-se o restante fixo.

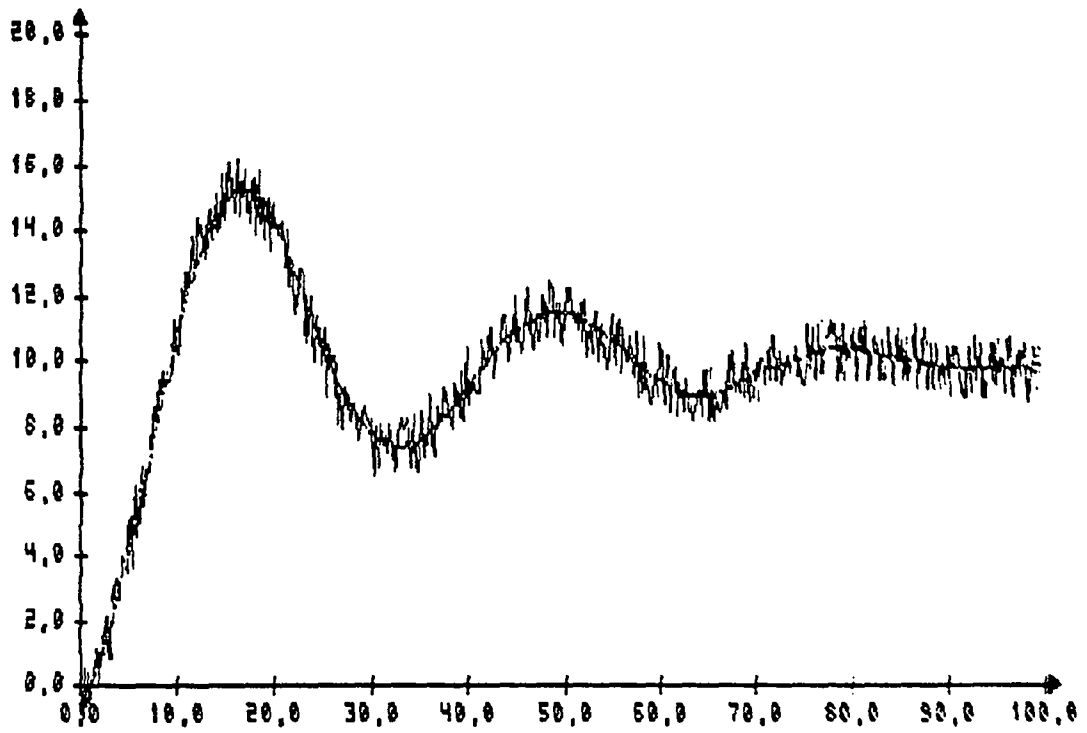


Fig. 4.9 - Período de amostragem de 0.2 segundos

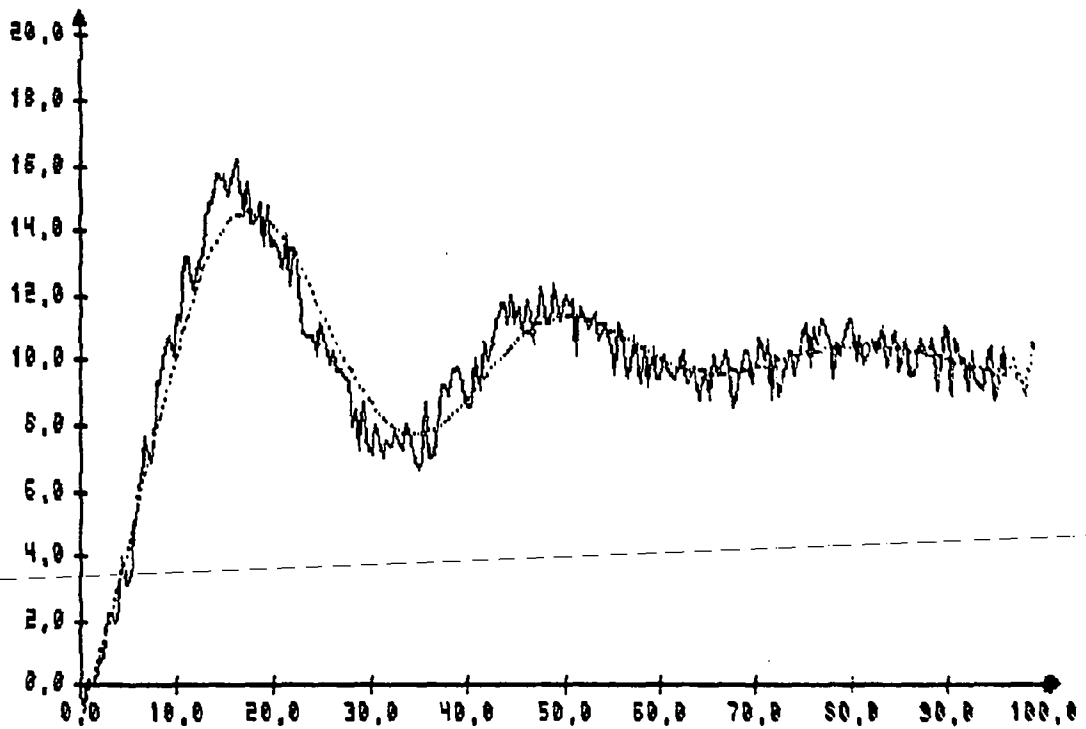


Fig. 4.10 - Período de amostragem de 0.5 segundos

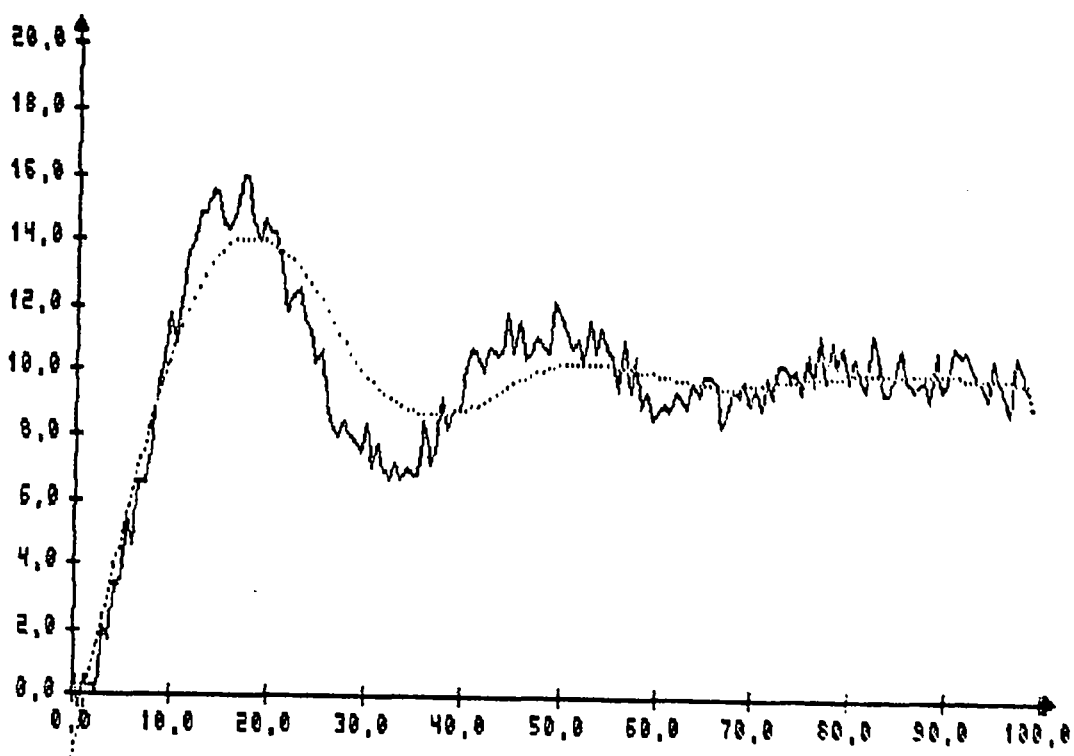


Fig. 4.11 - Período de amostragem de 0.8 segundos

#### 4.6. Determinação do número de pontos de um intervalo

No caso desta aplicação não podemos escolher, a cada vez que o método é aplicado, o valor do número  $M$ . Assim optou-se por manter este número fixo e com um pequeno valor, de modo que o método apresente resultados satisfatórios para diferentes tipos de respostas, apesar da possibilidade de ocorrerem os efeitos expostos acima, quando o número  $M$  é menor do que seu valor ótimo.

Este procedimento é aceitável pelo fato dos ruídos presentes nos sinais apresentarem pequenas amplitudes, devido a ação do filtro passa-baixa utilizado. A constante de tempo do filtro usado é da ordem de poucos segundos, a fim de não interferir na resposta do sistema, que possui constante de tempo da ordem de minutos ou horas. Desta maneira, após vários testes escolheu-se o valor de  $M=10$ . Este valor apresenta bons resultados para diferentes tipos de resposta e para uma amplitude máxima de ruído de 10% para uma mudança de referência de degrau unitário. As figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam o resultado da aplicação do método com  $M=10$  para diferentes situações possíveis de ocorrer.

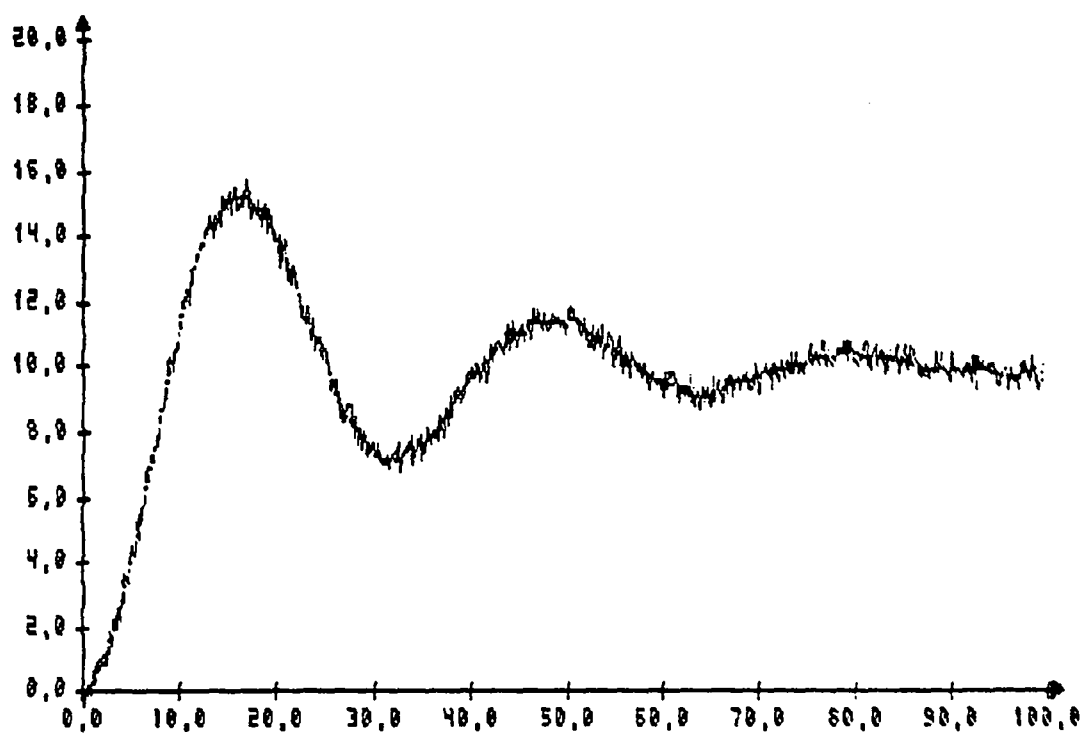


Fig. 4.12 - Resposta com variação de forma

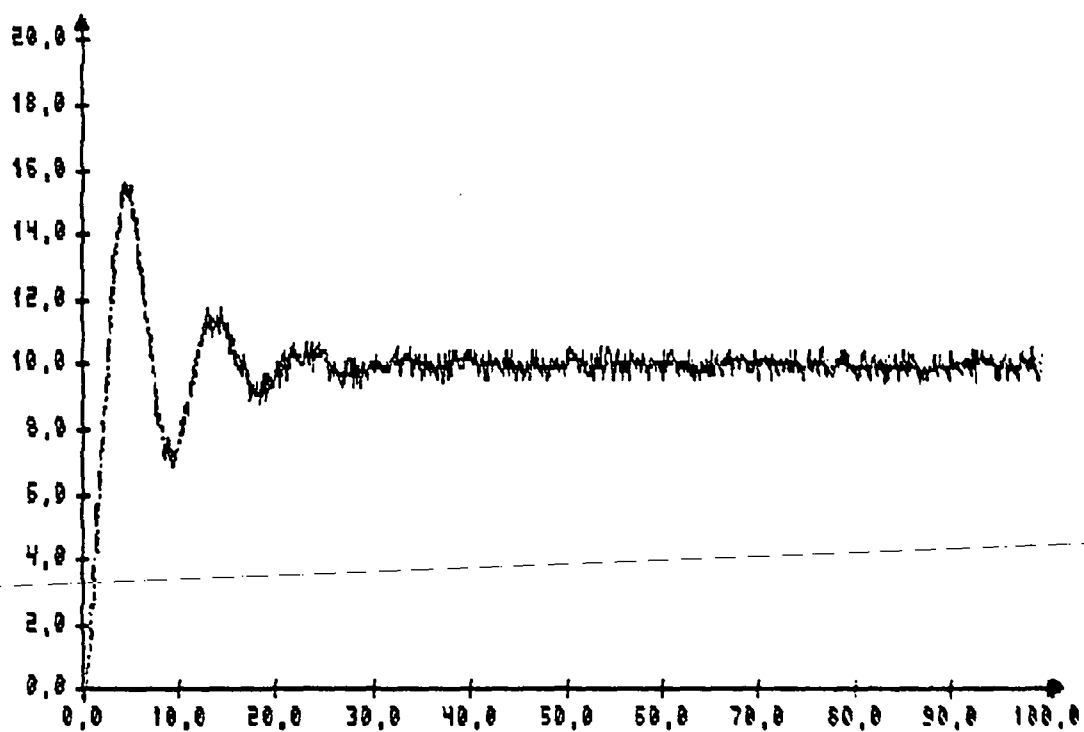


Fig. 4.13 - Resposta com muita variação de forma

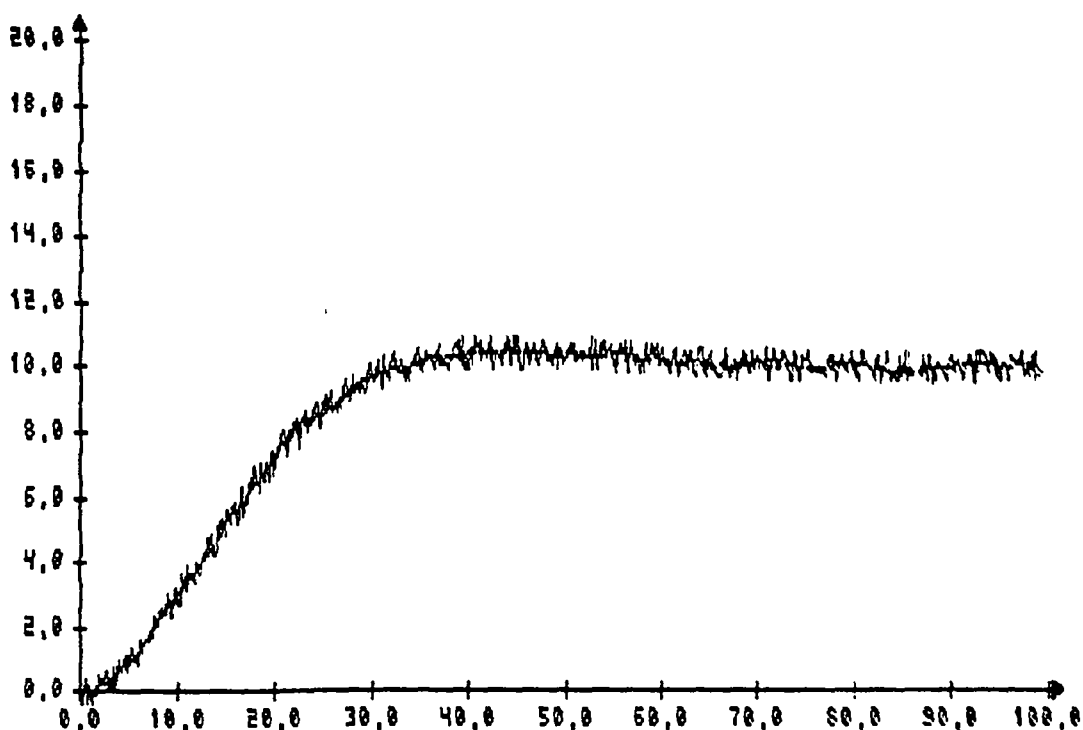


Fig. 4.14 - Resposta com pouca variação de forma

#### 4.7. Estratégia para determinação automática do número de pontos de cada intervalo (M)

A dependência do método do valor do número de pontos utilizado em cada regressão, pode ser contornada através do desenvolvimento de uma estratégia apropriada. Uma possibilidade é a utilização da redefinição do número M a cada regressão que for realizada, de modo a fazer com que este número seja adaptado a cada intervalo. Diferentes estratégias foram analisadas em ambiente de simulação. Estudos mais aprofundados ainda são necessários, a fim de obter-se um resultado adequado para implementação em tempo real. A estratégia que parece ser mais adequada, baseia-se na determinação de uma função correlação entre os pontos utilizados no ajuste de um intervalo e a curva ajustada neste mesmo intervalo.

A presente proposta de estratégia consiste em determinar através de uma função correlação, se a curva ajustada pelo método passa realmente através dos pontos utilizados no seu ajuste. Isto é necessário, pois como vimos, as condições de continuidade impostas tornam o ajuste de cada intervalo intimamente ligado ao intervalo anterior e disto resulta que pequenos erros no ajuste de um dado intervalo podem fazer com que o ajuste do intervalo seguinte não passe através

dos pontos usados no ajuste deste intervalo. Alternativamente pode-se trabalhar, ao invés de uma função correlação, com uma Faixa de Ruído sobreposta a cada amostra e comparar com os pontos da curva ajustada.

No caso da curva ajustada não passar entre os pontos usados no seu ajuste, significa que a curva ajustada para aquele intervalo está divergindo ou fugindo da posição onde deveria estar. Assim o número de pontos para este intervalo deve ser redefinido, bem como o número de pontos do intervalo anterior. Desta maneira deve-se redefinir os pontos do intervalo imediatamente anterior e reajusta-lo antes de proceder ao ajuste do intervalo atual. O número de pontos de cada intervalo é ajustado partindo-se de um valor máximo, que a medida que os intervalos são ajustados pode ser decrementado gradativamente até um valor adequado. Note-se que o número de pontos do intervalo imediatamente anterior deve ser redefinido até que o ajuste do intervalo atual fique satisfatório. Assim a quantidade de "backtrackings" necessários pode ser maior que um.

#### 4.8. Conclusões

O método desenvolvido mostra-se bastante poderoso na estimação da forma de onda da resposta do sinal. Entretanto a necessidade de uma definição correta do número de pontos utilizados para a regressão em cada intervalo, constitui-se na principal dificuldade para sua aplicação em tempo real.

No caso de utilização deste método em um simulador, a possibilidade de interação com o operador durante a execução de uma simulação, permite que manualmente o operador, a cada etapa de reconhecimento onde o método é aplicado, escolha o valor do número de pontos mais adequado para o ajuste das diversas curvas de regressão, conforme a observação dos resultados que obtém. Entretanto para aplicação em tempo real este tipo de procedimento, interativo com o operador, não é possível.

---

O problema da determinação do número de pontos necessários para cada intervalo de regressão pode ser entendido da maneira descrita a seguir. Cada intervalo é ajustado através de um polinômio de segunda ordem, ou seja, por uma curva que tem o comportamento de uma parábola. O método desenvolvido consiste portanto em fragmentar a forma de onda da resposta em vários intervalos, ajustando cada um destes por uma parábola. Quando a forma de onda de um intervalo não pode ser descrita pelas diferentes formas possíveis de serem assumidas por uma parábola, o número de pontos deste intervalo tem que ser



diminuído. O ajuste de um intervalo correspondente a dois períodos de um sinal senoidal, por exemplo, através de uma parábola, não fornece um resultado adequado. Entretanto se este intervalo for dividido em quatro partes e uma parábola for utilizada para cada um, o resultado obtido será muito melhor.

Outro aspecto relacionado a escolha do número de pontos é a relação existente entre intervalos consecutivos. A fim de garantir a continuidade e a suavidade das curvas ajustadas as condições impostas pelo método devem ser respeitadas. Contudo estas condições podem resultar na propagação de erros, a medida que os intervalos nos quais a curva original foi dividida são ajustados. Desta maneira um mal resultado no ajuste de um intervalo em parte pode ser consequência do ajuste não correto de seu intervalo imediatamente anterior. Portanto a rotina de determinação automática do número  $M$  deve ser capaz de redefinir o número de pontos do intervalo anterior e refazer seu ajuste, antes de redefinir o número de pontos do intervalo atual.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados de utilização do controlador desenvolvido no controle de um processo de laboratório implementado num simulador analógico. Neste simulador pode-se alterar constantes de tempo e ganhos do processo a ser controlado.

## CAPÍTULO V

### Resultados do funcionamento do PID-AA e comparação qualitativa com a abordagem a parâmetros fixos

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados resultados que ilustram o funcionamento do controlador implementado. Esta apresentação será realizada por partes. Assim as principais características da implementação do controlador poderão ser analisadas separadamente.

Através do estudo dos resultados do funcionamento do controlador PID-AA e de um PID clássico (parâmetros fixos) sobre um mesmo processo, uma análise comparativa qualitativa pode ser realizada. As principais vantagens do controlador desenvolvido são apresentadas, baseando-se no estudo realizado.

Os testes foram realizados utilizando-se um circuito analógico que possibilita a implementação de diferentes funções de transferência. Em todos os testes o tempo de amostragem utilizado foi de 0.2s e a função de transferência generalizada é representada por:

$$F(S) = \frac{\exp(-T_0 s) K_1 K_2}{(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_3)}$$

#### 5.2. Resultados da utilização das rotinas de reconhecimento

As informações necessárias para o funcionamento do controlador são obtidas através de dois tipos diferentes de reconhecimento : um realizado em malha aberta(RMA) e outro realizado em malha fechada(RMF). Os gráficos a seguir mostram alguns resultados obtidos pela utilização das rotinas que realizam estes reconhecimentos.

##### 5.2.1. Reconhecimento de malha aberta

A utilização do reconhecimento em malha aberta (RMA) permite obter o conhecimento "a priori" para o ajuste inicial do controlador de maneira automática. Foram realizados três testes demonstrativos para diferentes amplitudes de ruído presente no sinal. O ruído é gerado através de uma rotina de

"software", que adiciona ao sinal lido do processo uma amplitude que varia aleatoriamente entre zero e um valor máximo. Os parâmetros de malha aberta obtidos foram registrados para os casos considerados. (Fig. 5.1, 5.2 e 5.3)

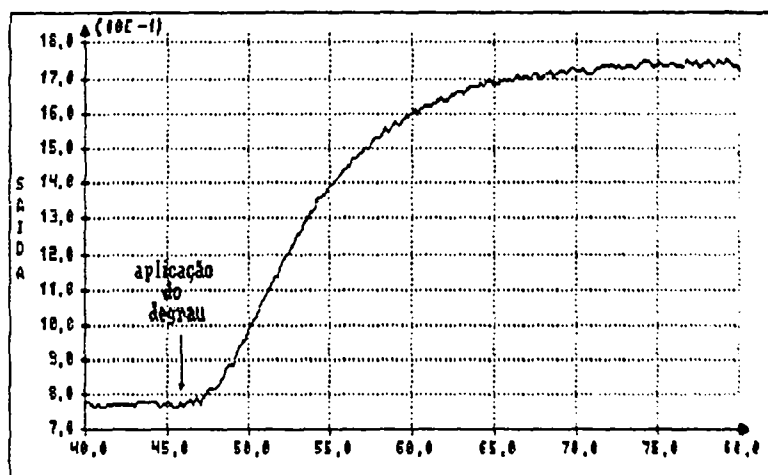


Fig. 5.1 - Curva de reação com ruído de amplitude máx. 0.02

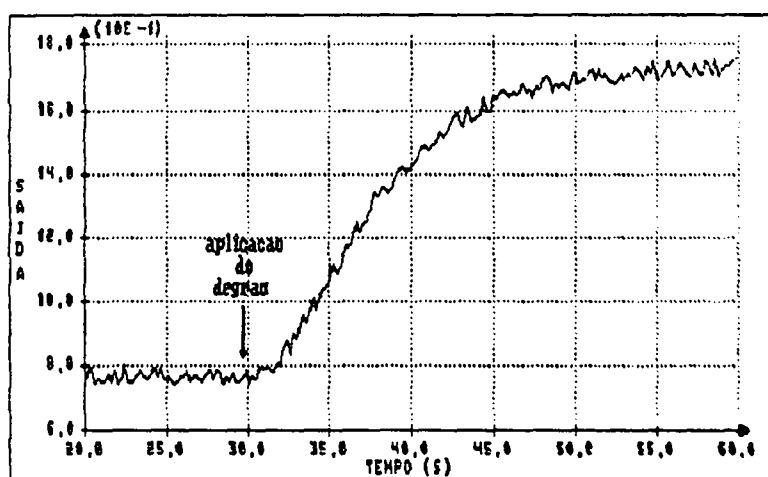


Fig. 5.2 - Curva de reação com ruído de amplitude máx. 0.06

Nestes testes o sistema utilizado é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

$$K_1=0.045, K_2=5.095, T_0=0s, T_1=0.75s, T_2=5.81s \text{ e } T_3=1.95s.$$

A tabela 5.1 resume os resultados obtidos durante os testes do reconhecimento de malha aberta para amplitudes de ruído de 0.02 unidades, 0.06 unidades e ruído nulo. Foram incluídos nesta tabela os valores obtidos pelo cálculo manual sobre a curva de reação com ruído nulo<sup>\* \*</sup>.

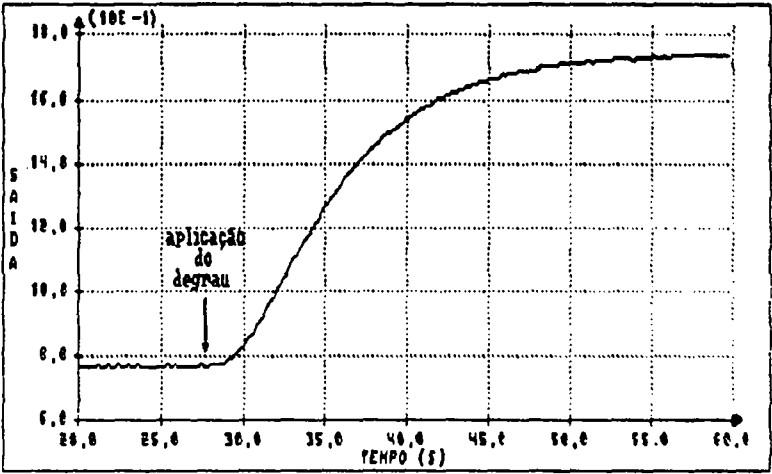


Fig. 5.3 – Curva de reação sem ruído

Amplitude de ruído	ganho estático	atraso de transporte	constante de tempo	ponto de inflexão
0.02	0.97	1.80	10.27	25.74 %
0.06	0.94	1.72	10.67	32.38 %
nulo	0.97	1.71	10.43	25.79 %
nulo**	0.97	1.76	10.59	25.60 %

Tabela 5.1 – Parâmetros do reconhecimento de malha aberta

A relação  $L/\tau$  para os casos tabelados é igual a 0.175, 0.161, 0.164 e 0.166 respectivamente. A diferença relativa entre estes valores é inferior a 10%, o que é bastante razoável para os fins do ajuste inicial do controlador.

Para contornar o problema do ruído presente no sinal é utilizada uma única regressão linear, utilizando-se um polinômio de segundo grau [Caetano 92]. Embora o ponto de inflexão não seja precisamente determinado, seu valor não é crítico para realização do ajuste inicial do controlador.

5.2.2. Reconhecimento de malha fechada

Durante o funcionamento em malha fechada podem ocorrer dois tipos de respostas : à mudanças de referência ou à perturbações de carga. Desta maneira, a princípio teria-se dois tipos de reconhecimento em malha fechada. Entretanto, observando-se atentamente as respostas às perturbações de carga, percebe-se

que após o primeiro pico da resposta ser atingido, a forma de onda restante comporta-se como se fosse simplesmente uma mudança de referência.

Baseando-se na observação deste comportamento das respostas, uma rotina foi implementada para extrair das formas de onda em malha fechada, as informações necessárias para o sistema especialista de ajuste dos parâmetros do controlador.

O gráfico da figura 5.4 ilustra o funcionamento da rotina implementada. Neste teste foi utilizado o mesmo sistema usado no teste do reconhecimento em malha aberta. Os valores fornecidos pela utilização da rotina de reconhecimento foram tabelados (Tabela 5.2). Os valores reais foram obtidos diretamente das formas de onda de resposta (Fig. 5.5 e 5.6), através da avaliação visual da melhor curva que representa o sinal original sem ruído.

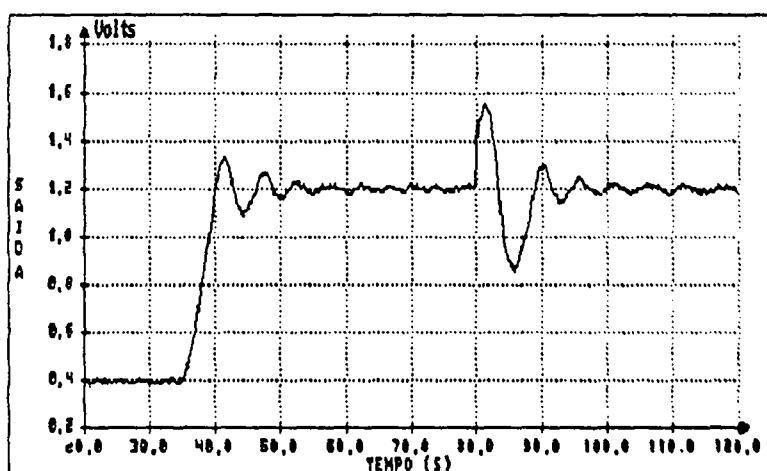


Fig. 5.4 – Reconhecimento de malha fechada

Parâmetro	Valor medido		Valor calculado	
	Referência	Perturbação	Referência	Perturbação
So	0.112	0.329	0.13	0.345
Su	0.081	0.078	0.10	0.095
So2	0.041	0.038	0.06	0.065
Su2	0.015	0.031	0.02	0.035
Ta	5.8	7.0	6.0	7.5

Tabela 5.2 – Valores do reconhecimento em malha fechada

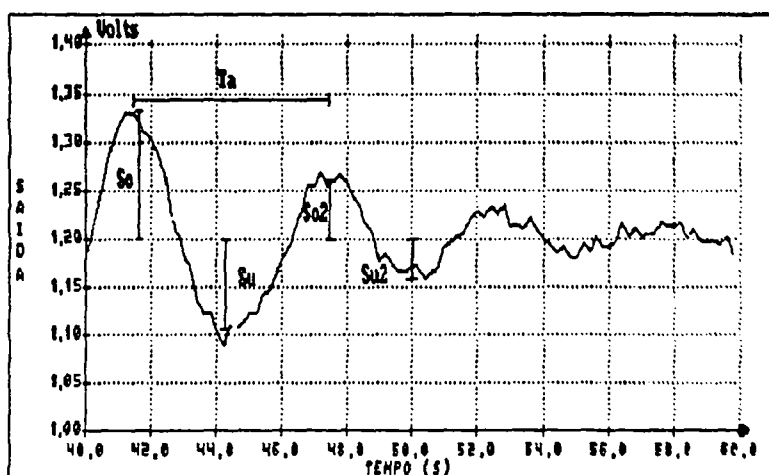


Fig. 5.5 - Detalhe do reconhecimento à mudanças de referência

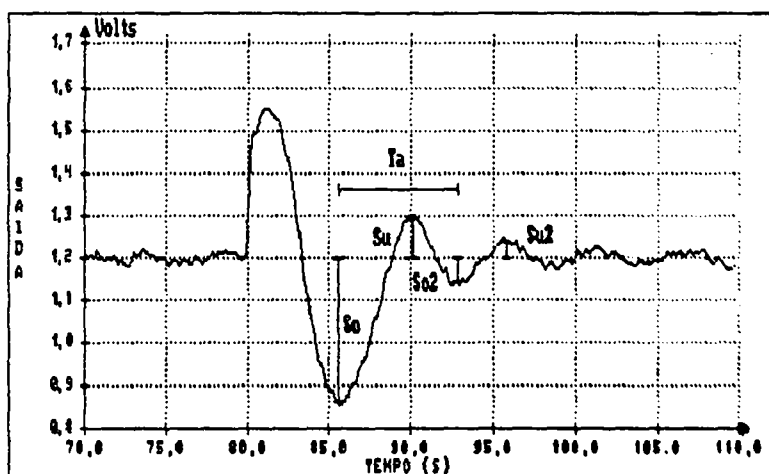


Fig. 5.6 - Detalhe do reconhecimento à perturbações de carga

### 5.3. Resultados da utilização do pré-processamento

A aplicação do método de ajuste de curvas, apresentado no capítulo anterior, contribui bastante para melhorar os resultados do reconhecimento de formas de onda corrompidas por ruído. Para demonstrar a atuação positiva do método, foram provocadas perturbações do tipo impulso na saída do processo sendo controlado.

Embora as amplitudes das perturbações impulsivas geradas possuam valores excessivamente elevados, pode-se verificar através dos resultados apresentados abaixo (figuras 5.7 e 5.8) a atenuação obtida pela aplicação do pré-processamento da resposta pelo método desenvolvido.

A aplicação do pré-processamento é essencial para as rotinas que realizam o reconhecimento das formas de onda, quando existe ruído presente no sinal. A ocorrência de distúrbios (perturbações ou ruídos) do tipo impulso pode resultar num reconhecimento incorreto da resposta do sistema. O pré-processamento não consegue rejeitar este tipo de situação indesejável, dependendo da amplitude atingida pela resposta nestes casos. Quando a amplitude é demasiadamente elevada, embora o método de suavização atenue bastante este valor, a resposta resultante ainda apresenta uma deformação em relação ao sinal original, caso não ocorresse o distúrbio impulsivo.

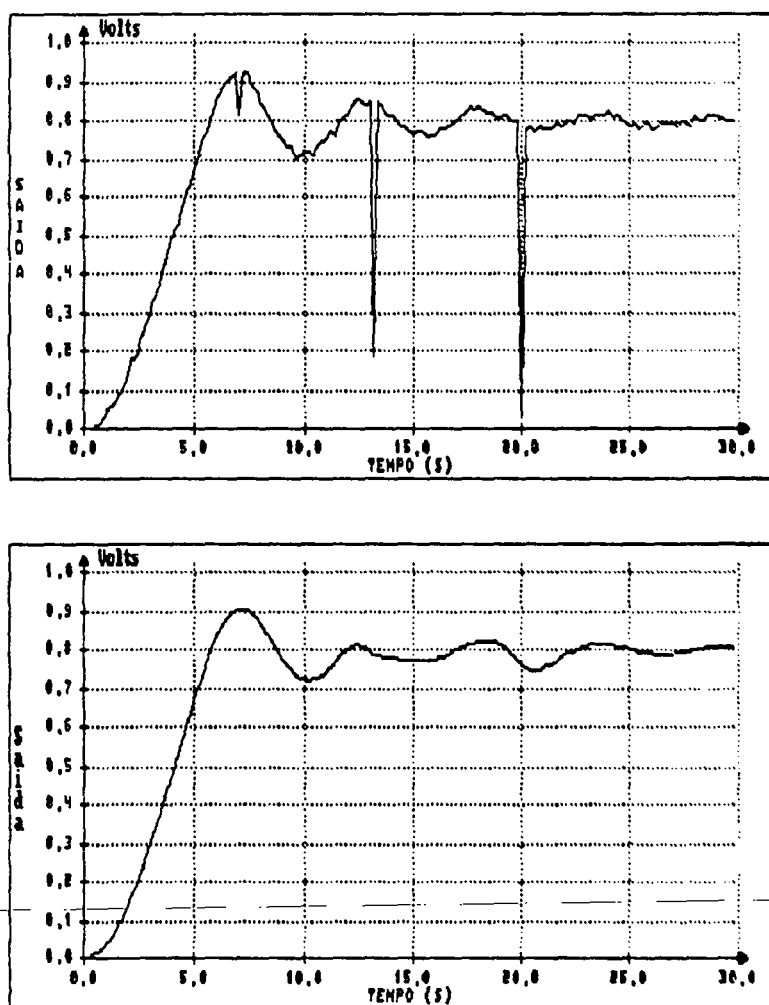


Fig. 5.7 - Resposta com perturbações impulsivas e sinal pré-processado correspondente

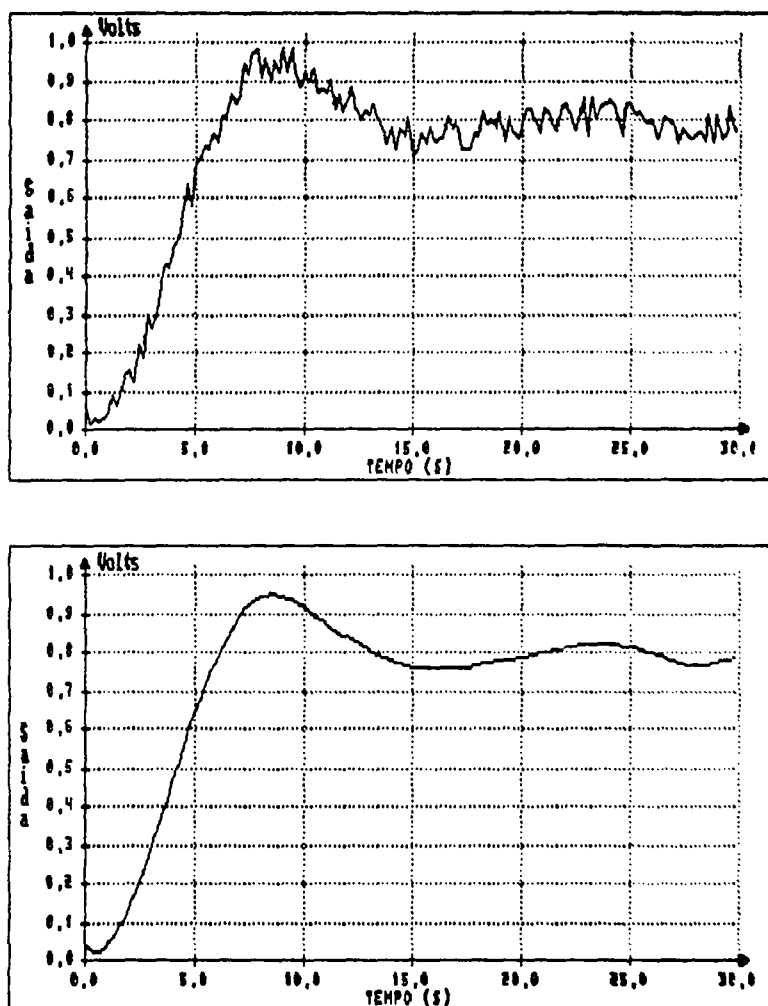


Fig. 5.8 – Resposta com ruído adicionado e sinal pré-processado correspondente

#### 5.4. Resultados do funcionamento do PID-AA

O funcionamento do controlador PID-AA será ilustrado através da apresentação de uma sequência completa de ajuste. Assim, foi realizado o ajuste inicial dos parâmetros do controlador através do método de ZNM. A seguir, com os parâmetros assim ajustados, foram realizadas mudanças de referência e perturbações de carga.

Nestes testes o sistema utilizado é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

$$K_1=0.486, K_2=1.10, T_0=1.0s, T_1=0.0s, T_2=7.05s \text{ e } T_3=6.86s.$$



O resultado da utilização do ajuste automático dos parâmetros do controlador não fornece necessariamente o conjunto ótimo de parâmetros. Entretanto o ajuste obtido é bastante satisfatório. Após poucos ciclos de atuação do mecanismo de auto-ajuste é atingido um conjunto de parâmetros que fornecem uma resposta dentro das especificações.

O ajuste inicial por ZNM pode ser comparado com o ajuste realizado através do método original de Ziegler&Nichols(ZN). O ajuste fornecido por este método normalmente fornece respostas com maiores sobressinais do que àquele obtido com o método de ZNM.

Observando os valores dos parâmetros da tabela 5.3, nota-se que o ajuste inicial por ZNM fornece valores bem próximos àqueles do controlador ajustado (resposta dentro das especificações somax 10 % e sumax 5%).

No caso do ajuste realizado por ZNM foi necessário apenas um ciclo de ajuste tanto para mudança de referência quanto para perturbação de carga. Isto pode ser verificado através dos gráficos da figura 5.9. A partir da segunda resposta à mudança de referência e à perturbação, o controlador já está ajustado.

Tipo de ajuste	Parâmetros Referência			Parâmetros Perturbação		
	Kcr	Tir	Tdr	Kcp	Tip	Tdp
ajuste inicial por ZNM	1.79	11.07	1.75	2.60	7.25	1.41
ajuste inicial por ZN	3.20	4.92	1.23	3.20	4.92	1.23
parâmetros de ajuste	1.79	15.65	1.75	2.60	6.16	1.41

Tabela 5.3 - Ajuste inicial dos parâmetros do controlador

No caso do ajuste através de ZN para mudanças de referência foram necessários seis (6) ciclos de ajuste. Para perturbações de carga o resultado foi mais bem sucedido e apenas um ciclo de ajuste foi necessário (figura 5.10). Neste caso as duas últimas perturbações presentes no gráfico foram provocadas com amplitudes maiores propositalmente, a fim de confirmar se o controlador realmente estava ajustado.

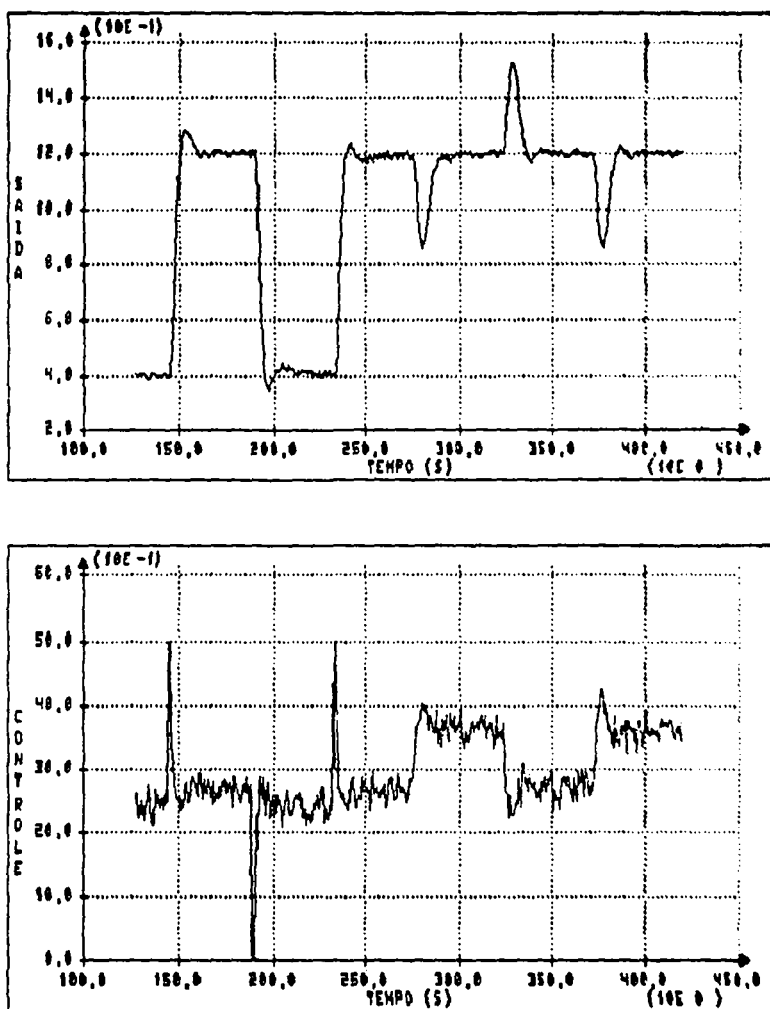


Fig. 5.9 – Resposta do sistema ajustado por ZNM

O funcionamento do mecanismo de auto-ajuste pode ser ilustrado através dos gráficos da figura 5.10. Nesta figura uma seqüência de mudanças de referência foi realizada, até os parâmetros de ajuste fornecerem uma resposta dentro das especificações. A evolução do ajuste dos parâmetros de referência do controlador pode ser observada na tabela 5.4.

Examinando a tabela 5.4 pode-se perceber que inicialmente todos os parâmetros do controlador são alterados. Em seguida apenas é ajustado o ganho. Isto ilustra a estratégia de ajuste descrita no capítulo 2. Inicialmente é ajustada a fase do controlador e a seguir determina-se o valor do ganho necessário para o ajuste.

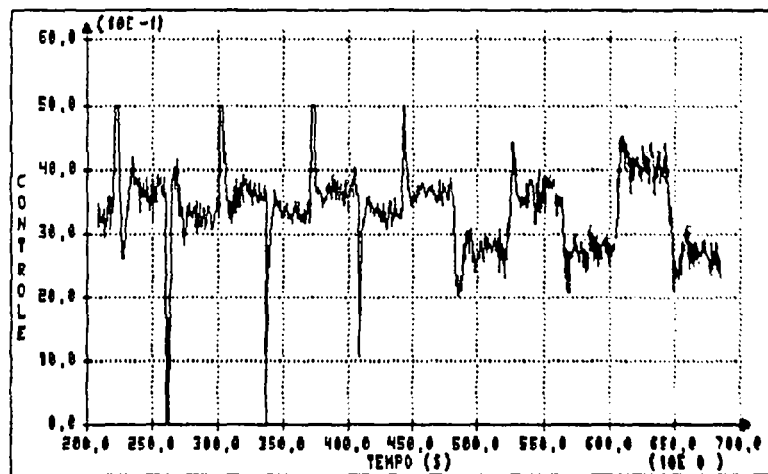
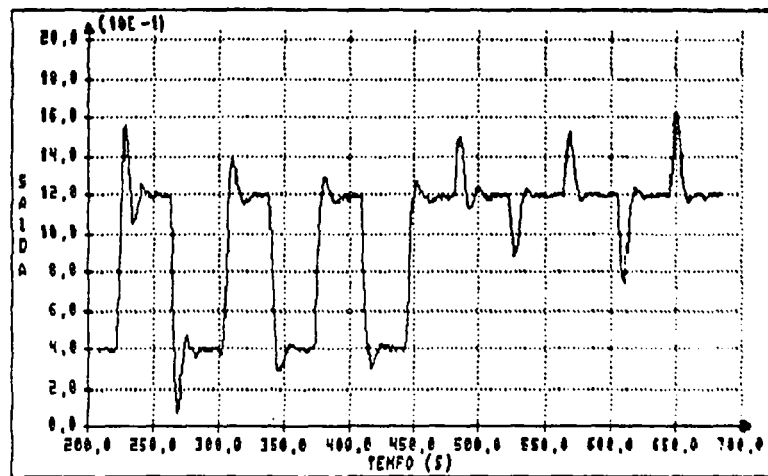


Fig. 5.10 – Resposta do sistema ajustado por ZN

Parâmetros =	Kcr	Tir	Tdr	Grupo
ajuste inicial	3.20	4.92	1.23	2
primeiro	2.84	8.24	1.19	2
segundo	2.01	10.26	1.20	2
terceiro	1.75	12.63	1.34	3
quarto	1.64	12.63	1.34	3
quinto	1.56	12.63	1.34	3
ajuste final	1.47	12.63	1.34	0

Tabela 5.4 – Sequência de ajustes de referência a partir de ZN

Os parâmetros não fornecem necessariamente a resposta ótima, mas sim uma resposta de acordo com as especificações definidas. Por este motivo o conjunto de parâmetros do controlador ajustado neste caso difere daquele encontrado na tabela 5.3. O conjunto de parâmetros de ajuste da tabela 5.3 resultou da comparação de diferentes respostas. Foi escolhido o conjunto que forneceu a resposta mais próxima aos limites impostos pelas especificações.

### 5.5. Comparação entre o PID-AA e um PID clássico

Os dois controladores foram devidamente ajustados com os parâmetros "ótimos" de funcionamento. Uma mudança paramétrica foi realizada através do aumento do ganho do processo ( $K_2$ ). O comportamento dos dois controladores, antes e após a perturbação ocorrer, foi observado. Os processos utilizados são caracterizados pelos seguintes valores :

-processo inicial (sistema 1)

$K_1=0.486$ ,  $K_2=1.10$ ,  $T_0=2.0s$ ,  $T_1=0.0s$ ,  $T_2=7.05s$  e  $T_3=6.86s$ .

-processo modificado (sistema 2)

$K_1=0.486$ ,  $K_2=2.33$ ,  $T_0=2.0s$ ,  $T_1=0.0s$ ,  $T_2=7.05s$  e  $T_3=6.86s$ .

O controlador PID clássico, após a mudança no processo ser realizada, não apresenta um bom desempenho qualitativo em suas respostas à mudanças de referência ou perturbações de carga, pois seus parâmetros permanecem ajustados para o processo inicial.

Por outro lado, o controlador PID-AA, que percebe a mudança introduzida no processo e pode alterar seus parâmetros de controle, após alguns ciclos de ajuste (4 para referência e 2 para perturbações), atinge um conjunto de parâmetros que fornecem boas respostas à mudanças de referência e perturbações de carga.

Nos dois casos, respostas à perturbações de carga e respostas à mudança de referência, inicialmente é apresentada a resposta para o controlador ajustado (duas primeiras respostas nos gráficos Fig. 5.11 e 5.12). Em seguida é realizada a mudança paramétrica.

A figura 5.11 apresenta as respostas para o caso de perturbações. O mecanismo de auto ajuste utiliza a própria mudança paramétrica para realizar o

primeiro ciclo de ajuste dos parâmetros de perturbação. Apenas mais um ciclo de ajuste foi necessário para ajustar a resposta dentro das especificações. Portanto a segunda e terceira resposta, após a perturbação paramétrica ter sido realizada, representam o resultado do ajuste do controlador ao novo sistema. As duas últimas respostas na figura 5.11 correspondem ao controlador PID com parâmetros fixos.

Parâmetros =	Kcp	Tip	Tdp	Grupo
ajuste inicial	1.21	7.75	1.92	0
Perturbação Paramétrica no Sistema				
primeiro	1.21	7.75	1.92	2
segundo	0.72	6.58	1.67	2
ajuste final	0.64	7.99	2.07	0

Tabela 5.5 - Sequência de ajustes para o caso de perturbações

Parâmetros =	Kcr	Tir	Tdr	Grupo
ajuste inicial	0.95	12.25	1.87	0
Perturbação Paramétrica no Sistema				
primeiro **	0.95	12.25	1.87	2
segundo	0.66	10.03	1.51	2
terceiro	0.51	10.62	1.58	3
quarto	0.47	10.62	1.58	3
ajuste final	0.40	10.62	1.58	0

Tabela 5.6 - Sequência de ajustes para o caso de referências

Comparando-se as respostas obtidas com o PID-AA e o PID a parâmetros fixos percebe-se nitidamente a melhor qualidade de resposta do controlador PID-AA. A tabela 5.5 apresenta a evolução dos parâmetros até o controlador se ajustar.

O ajuste dos parâmetros do controlador para o caso de mudanças de referência está ilustrado pela figura 5.12. A primeira mudança de referência, após

a perturbação, corresponde à resposta de um controlador PID a parâmetros fixos<sup>\*\*</sup>. Pode-se observar o elevado sobresinal provocado pelo aumento do ganho do sistema inicial. Mais três ciclos de ajuste são necessários para o controlador se ajustar. A tabela 5.6 apresenta a evolução dos parâmetros do controlador.

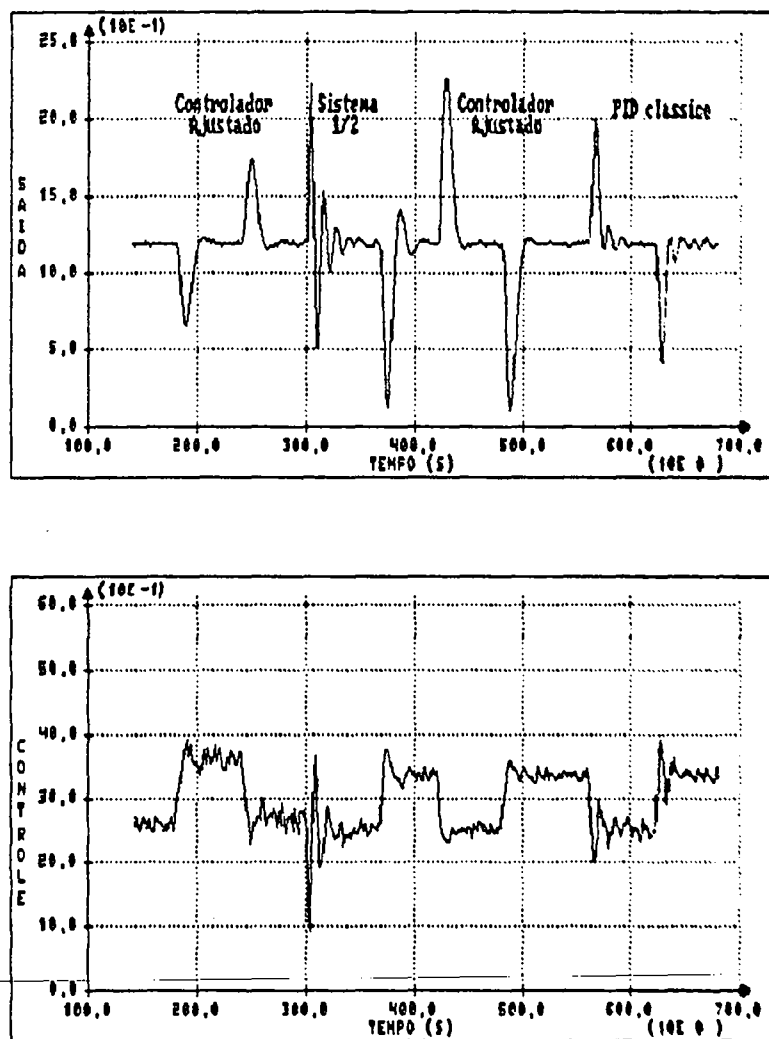


Fig. 5.11 - Resposta à perturbações de carga

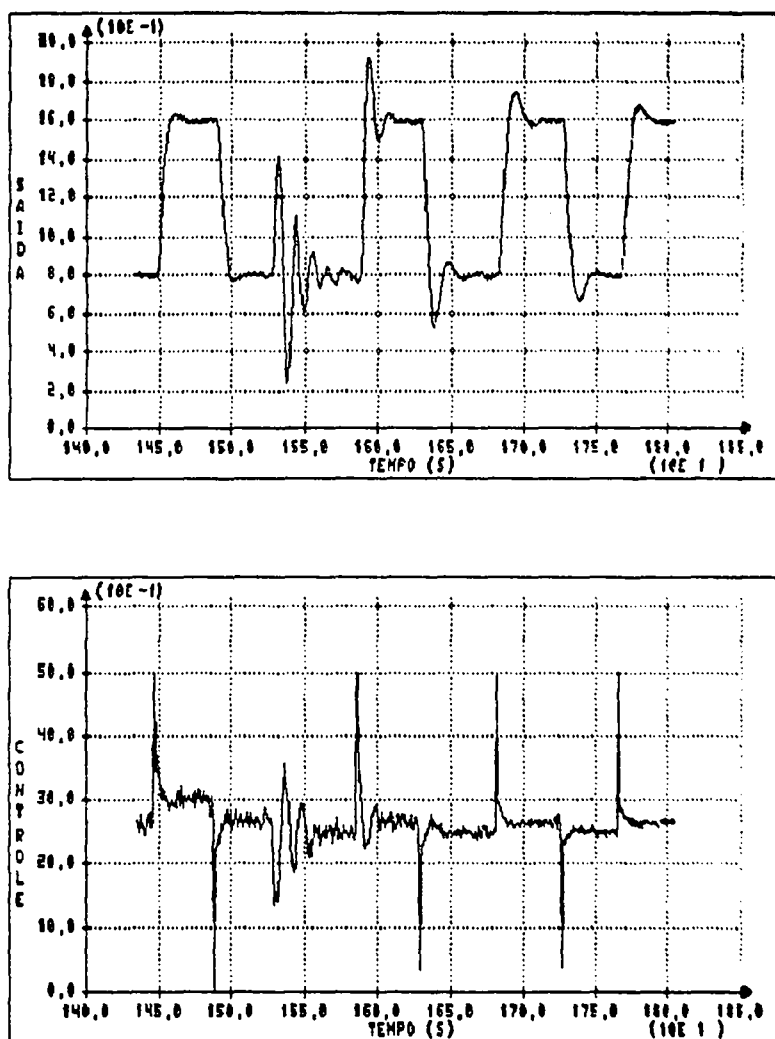


Fig. 5.12 - Resposta à mudanças de referência

### 5.6. Resultados da atuação do supervisor frente a oscilações

A detecção de oscilações com amplitudes crescentes é realizada pelo módulo supervisor, que atua de modo a abaixar o ganho do controlador. A figura 5.13 ilustra a atuação do supervisor quando oscilações crescentes ocorrem (instabilidade do sistema).

Neste teste os processos utilizados são caracterizados pelos seguintes parâmetros :

-processo inicial (sistema 1)

$K_1=0.486$ ,  $K_2=2.33$ ,  $T_0=2.0s$ ,  $T_1=0.0s$ ,  $T_2=7.05s$  e  $T_3=0.0s$ .

-processo modificado (sistema 2)

$K_1=0.486$ ,  $K_2=2.33$ ,  $T_0=6.0s$ ,  $T_1=0.0s$ ,  $T_2=7.05s$  e  $T_3=0.0s$ .

Parâmetros =	Kcr	Tir	Tdr	Grupo
ajuste inicial	0.40	3.30	0.46	0
Detecção de Oscilação na resposta				
primeiro	0.20	3.30	0.46	2
segundo	0.18	3.30	1.18	2
terceiro	0.18	3.63	1.18	3
ajuste final	0.11	3.63	1.18	0

Tabela 5.7 - Seqüência de ajustes após a oscilação detectada

O controlador encontra-se inicialmente ajustado com parâmetros adequados para o processo inicial (sistema 1). Uma perturbação paramétrica é introduzida através da modificação do atraso de transporte do sistema, que é alterado de 2.0s para 6.0s. Portanto o atraso passa de um total de 10 amostras para 30 amostras em atraso (tempo de amostragem de 0.2s). O controlador conseguiu perceber a oscilação da resposta do sistema. Em seguida três perturbações de carga foram provocadas, de modo que o controlador se auto ajustasse ao novo processo.

Inicialmente o reconhecimento de perturbações foi ativado através da ultrapassagem do dobro da faixa de ruído(neste caso  $FR=0.02$ ) pelo sinal. Durante o reconhecimento os dois primeiros máximos locais e os dois primeiros mínimos locais são comparados entre si. Como ocorreu um aumento das amplitudes relativas dos pontos de máximo e mínimo, o supervisor identificou a resposta como oscilatória. Desta maneira o ganho do controlador passou do valor inicial de 0.40 para 0.20. Após três ciclos de auto ajuste, um novo conjunto de parâmetros "ótimos" foi atingido. A tabela 5.7 apresenta a seqüência de ajustes obtidos.



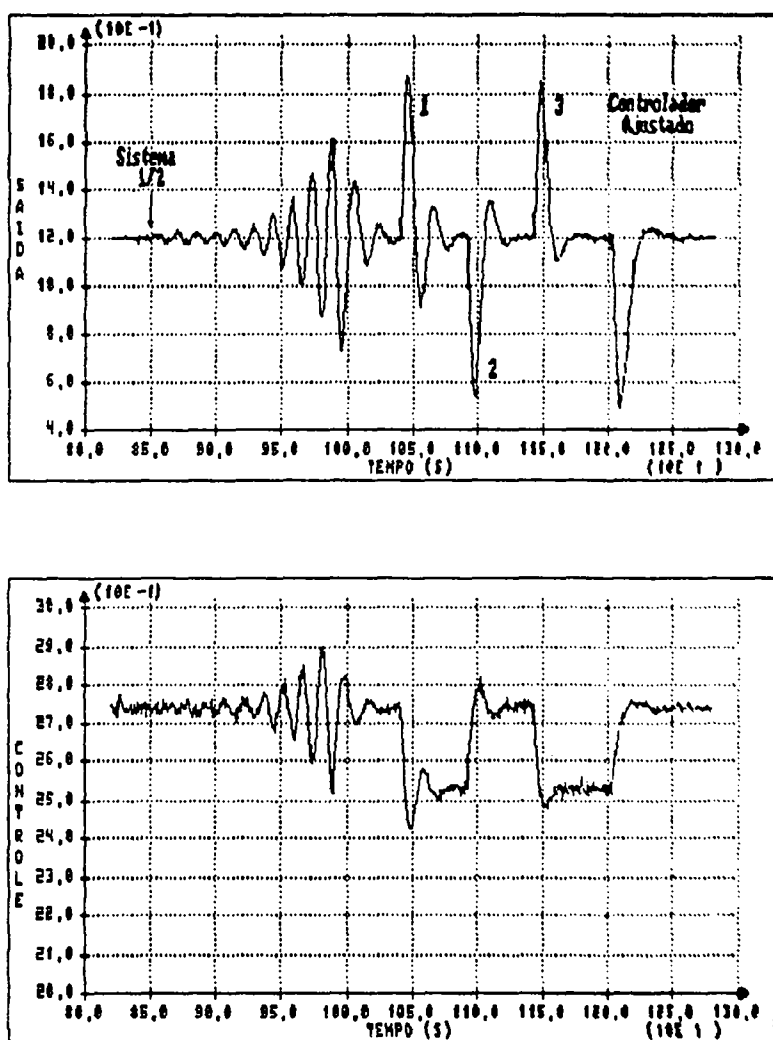


Fig. 5.13 - Detecção de sistema instável com oscilações

### 5.7. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns resultados práticos do funcionamento do controlador PID-AA, selecionados dentre diversos outros testes que foram realizados.

Os resultados apresentados demonstram o funcionamento da ordem clássica, graças aos mecanismos de ajuste automático e auto ajuste.

Desta maneira, o desempenho do controlador PID-AA é igual ou superior ao

desempenho obtido por um controlador equivalente a parâmetros fixos. Além disto o mecanismo de ajuste automático determina um conjunto inicial de parâmetros

bem próximo àquele que forneceria uma resposta dentro das especificações (parâmetros "ótimos").

No próximo capítulo serão apresentados outros resultados da utilização do controlador PID-AA. Neste caso sobrdagem clássica, graças aos mecanismos de ajuste automático e auto ajuste.

Desta maneira, o desempenho do controlador PID-AA é igual ou superior ao desempenho obtido por um controlador equivalente a parâmetros fixos. Além disto o mecanismo de ajuste automático determina um conjunto inicial de parâmetros bem próximo àquele que forneceria uma resposta dentro das especificações (parâmetros "ótimos").

No próximo capítulo serão apresentados outros resultados da utilização do controlador PID-AA. Neste caso sobre plantas pilotos de laboratório. Uma análise comparativa com outra abordagem adaptativa será apresentada.

## CAPÍTULO V I

### Comparação qualitativa entre o PID-AA e outra abordagem adaptativa

#### 6.1. Introdução

No capítulo 1 foram apresentados dois tipos de abordagens possíveis para a implementação de controladores auto-ajustáveis: matemática ou heurística. Neste capítulo são comparados de maneira qualitativa dois controladores. A abordagem heurística é representada pelo controlador PID-AA. Para a abordagem matemática escolheu-se o controlador adaptativo-preditivo (Generalized Predictive Controller - GPC) [Clarke 87].

Inicialmente será descrito o controlador GPC e justificada a escolha realizada. A seguir serão apresentados os processos utilizados neste estudo comparativo. Estes processos são constituídos por duas plantas piloto de laboratório. Embora estes processos sejam bastante simples, a experiência adquirida durante a execução dos testes permitiu a formação de uma percepção crítica sobre os controladores em estudo. Desta maneira o estudo comparativo foi direcionado sob o ponto de vista do usuário final de um equipamento de controle de processos e não do ponto de vista de testes de desempenho.

Após a apresentação dos resultados das experiências realizadas sobre as plantas piloto, uma análise crítica dos resultados será realizada. Assim, procurou-se com este estudo definir as características de cada abordagem, a fim de permitir a aplicação mais adequada destes controladores.

#### 6.2. O controlador GPC

O controlador GPC foi escolhido pelo fato de, como sugere o artigo escrito por Clarke [Clarke 87], constituir-se na evolução de dois tipos de controladores muito difundidos: controlador baseado em mínima variância ("Generalized Minimum Variance - GMV") e baseado em alocação de polos ("Pole Placement"). O controlador GPC combina estes dois algoritmos. O algoritmo consiste em estimar os coeficientes da função de transferência do modelo da planta, utilizando mínimos quadrados, sujeitos à minimização de uma função custo objetivo.

Os primeiros estudos sobre controladores preditivos foram realizados na década de 1960. Smith [Smith 59] propôs um controlador baseado na utilização de um modelo de predição e num controlador clássico. O

preditor de Smith tinha por objetivo considerar o efeito de atraso dentro da malha de controle. Outros algoritmos foram propostos como o célebre algoritmo de controle por mínima variância de Åström e Wittenmark [Åström 73]. O controlador GPC é uma generalização dos algoritmos a horizonte estendido .

O algoritmo do controlador GPC depende da integração de cinco idéias fundamentais [Clarke 87] :

- \* adoção do modelo CARIMA ao invés do CARMA
- \* utilização de um horizonte de predição estendido ao invés de um horizonte finito, maior que o tempo morto da planta e ao menos igual a ordem do modelo
- \* equação de Diaphantine na forma recursiva
- \* considerar pesos na contribuição dos incrementos da ação de controle na função custo
- \* escolha de um horizonte de controle após o qual os incrementos na ação de controle são iguais a zero.

Muitas destas idéias são encontradas na literatura e sua combinação é que confere ao algoritmo do GPC todo seu potencial.

Este controlador emprega um modelo discreto para representar o processo a ser controlado. Na implementação realizada utilizou-se um modelo linear no tempo do tipo CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) :

$$A(q^{-1}) Y(t) = B(q^{-1}) U(t-1) + C(q^{-1}) \Delta(t)/X \quad (6.1)$$

onde:

$Y(t)$ : saída do processo (variável controlada)

$U(t)$ : ação de controle

$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^n$

$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^m$

$C(q^{-1}) = c_0 + c_1 q^{-1} + \dots + c_l q^l$

$q^{-1}$  é o operador atraso, ex.:  $q^{-1} Y(t) = Y(t-1)$

$\Delta(t)$  é uma sequência aleatória não correlacionada.

$X = 1 - q^{-1}$  é um integrador

$t$  é o instante de amostragem.

Para que o controlador seja adaptativo os coeficientes dos polinômios A, B e C devem ser estimados "on-line". Neste trabalho utilizou-se o método dos mínimos quadrados recursivos com um fator de esquecimento igual a 0.97. [Seborg 86].

A idéia chave desta abordagem (controle a "horizonte estendido") consiste em determinar, a partir do instante  $t$ , uma seqüência de  $NU$  ações de controle, fazendo-se com que no instante  $t+N$  a variável controlada atinja a referência desejada seguindo uma trajetória de referência definida pelo algoritmo de controle, conforme mostra a figura 6.1.

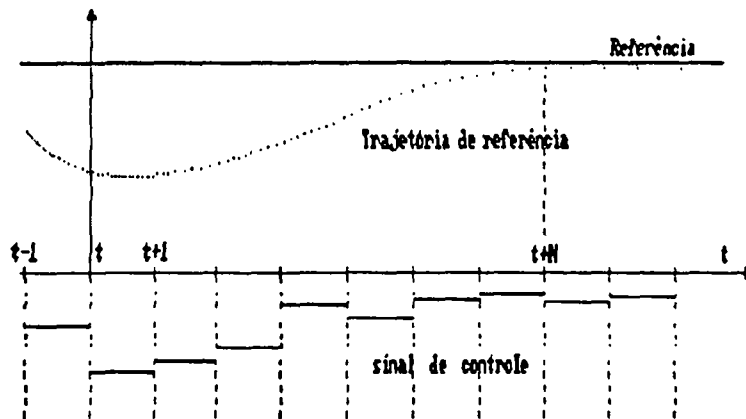


Fig. 6.1 - Saída, "set-point" e ação de controle no GPC.

A seqüência de controle é calculada utilizando-se uma forma preditiva do modelo do processo e através da minimização da função objetivo definida pela equação 6.2.

$$J(1,N)=E\left\{\sum_{j=1}^n [Y(t+j)-Y_{ref}(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^n (j)[\mu U(t+j+1)]^2\right\} \quad (6.2)$$

onde:

$N$  é o horizonte de predição

$$Y_{ref} = Y(t+j-1) + (1-\lambda) Y_r$$

$\mu$  e  $\lambda$  são parâmetros de projeto do controlador

Nesta equação, o primeiro termo penaliza o erro do sistema e o segundo penaliza o incremento na ação de controle (energia gasta).

A relação recursiva que permite que em todo instante  $t$  se calcule a seqüência de controle a ser implementada é dada por:

$$U = (GTG + \lambda I)^{-1} GT (W-f) \quad (6.3)$$

onde:

$$U = [\Delta U(t), \Delta U(t+1), \dots, \Delta U(t+N+1)]^T$$

$$W = [Y_{ref}(t+1), Y_{ref}(t+2), \dots, Y_{ref}(t+N)]^T$$

O vetor  $f$  e a matriz  $G$  compõem a forma preditiva do modelo do processo.

Uma das características do GPC é a necessidade de se calcular futuras ações de controle, necessitando-se para isso da inversão de matrizes, conforme mostra a equação (6.3). No entanto, considerando-se que depois de  $NU < N$  os incrementos da ação de controle são nulos, ou seja:

$$U(t+j-1) = 0 \quad j > NU$$

onde  $NU$  é chamado de horizonte de controle, e ainda, fazendo-se  $NU=1$ , tem-se o cálculo de um escalar e somente uma ação de controle é considerada, sendo as demais igualadas a  $U(t)$ . Estas hipóteses propiciam uma redução na carga computacional tornando a versão adaptativa deste esquema viável para implementação em tempo real.

### 6.3. Processos utilizados no estudo comparativo

A unidade experimental utilizada contém duas plantas piloto de laboratório : um trocador de calor e um sistema de tanques acoplados. Os controladores foram implementados através de um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados.

#### 6.3.1. Trocador de calor

O trocador de calor é constituído por um tanque cujas paredes estão envolvidas por uma camisa de água de refrigeração (figura 6.2). A água no interior do tanque é aquecida por meio de uma resistência elétrica ( $R$ ) e um agitador mecânico garante a uniformidade da temperatura interna. A temperatura no interior do tanque é medida através de um termopar.

A temperatura da água no tanque é controlada mediante o circuito de refrigeração, que tem sua ação determinada pela válvula que regula o fluxo da água que atravessa a camisa existente nas paredes do tanque. Perturbações do tipo degrau sobre o sistema são provocadas através da variação do calor produzido pela resistência ( $R$ ).

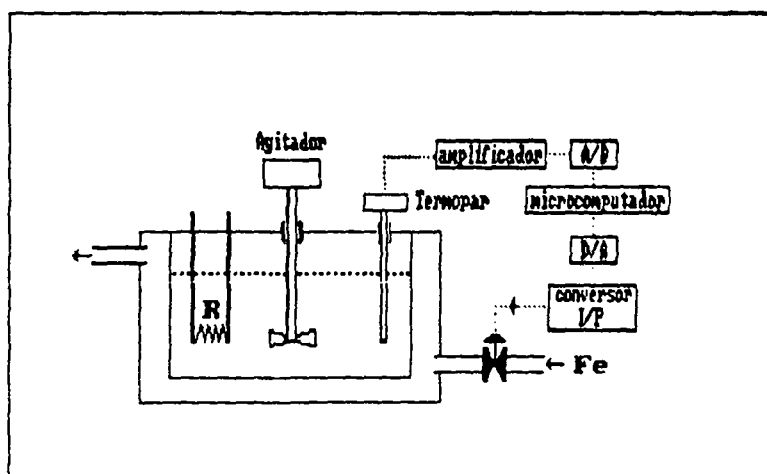


Fig. 6.2 - Trocador de calor

O sinal de controle determina a abertura da válvula e portanto regula o fluxo de água que atravessa a camisa de refrigeração. Desta maneira a variável controlada possui comportamento oposto ao sinal de controle aplicado. Quanto maior o sinal de controle aplicado, maior a refrigeração e conseqüentemente menor a temperatura resultante no tanque (variável controlada).

### 6.3.2. Sistema de tanques acoplados

Este sistema é formado por dois tanques interligados. A alimentação é realizada sobre o primeiro tanque e controlada por uma válvula pneumática. O nível do segundo tanque é medido por um sensor de pressão (figura 6.3). O fluxo entre os tanques e o fluxo de saída podem ser ajustados através dos registros V1 e V2. Através do ajuste da abertura dos registros podemos obter diferentes pontos de operação para o sistema.

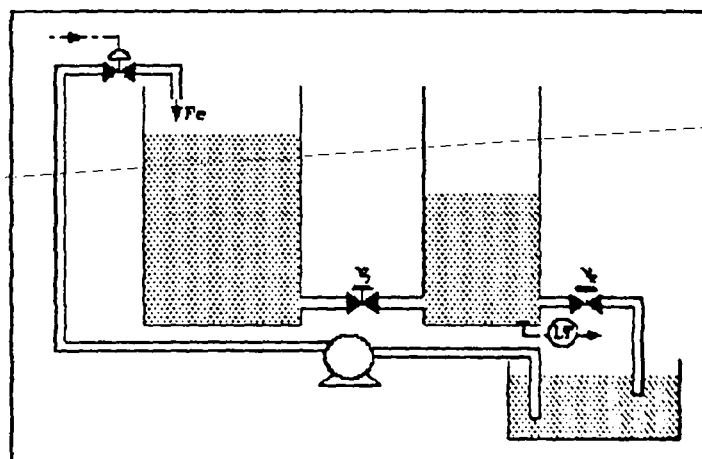


Fig. 6.3 - Sistema de tanques acoplados

#### 6.4. Resultados obtidos no controle das plantas piloto

Os dois controladores foram testados sobre diferentes situações da planta. Vários casos foram estudados, sendo aqui apresentados os resultados correspondentes a dois deles:

-Caso 1 : estudo dos controladores atuando como reguladores sobre o trocador de calor e análise de respostas a perturbações e comportamento frente a variação do tempo de atraso de transporte.

-Caso 2 : estudo dos controladores operando sobre o sistema de tanques acoplados e do comportamento frente a variação na estrutura da planta (ordem do processo).

##### 6.4.1. Análise de resultados sobre o trocador de calor

Os resultados correspondentes ao PID-AA são mostrados nas figuras 6.4 e 6.5. Inicialmente os parâmetros do controlador foram ajustados através do mecanismo de ajuste automático. Os parâmetros assim obtidos correspondem ao primeiro conjunto de valores de  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  apresentados na figura 6.4.

Três perturbações ( $p_1, p_2, p_3$ ) são necessárias para que o controlador se auto-ajuste às especificações (sobrepasso 10% e subpasso 5%). Em  $t=6400s$  o módulo supervisor do controlador detectou uma oscilação mantida da variável controlada e automaticamente o ganho do PID foi diminuído de 50%. Este último ajuste deteriora o desempenho da resposta transitória a custo de reduzir a oscilação no controle, fazendo com que a válvula seja menos requisitada. Em  $t=7300s$  é introduzido um atraso de transporte de 30 s e uma perturbação é provocada ( $p_4$ ). O controlador necessita de mais três perturbações ( $p_5, p_6, p_7$ ) para auto-ajustar-se novamente.



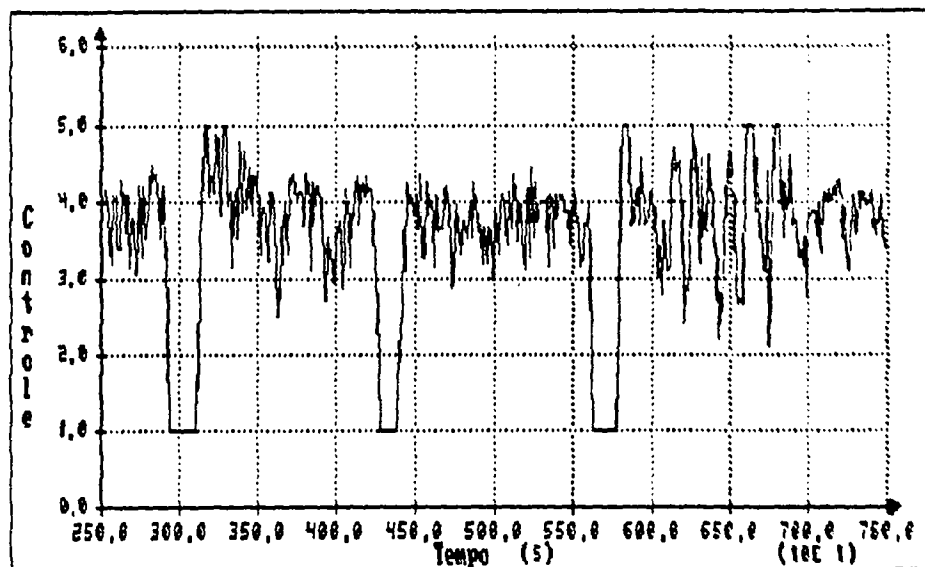
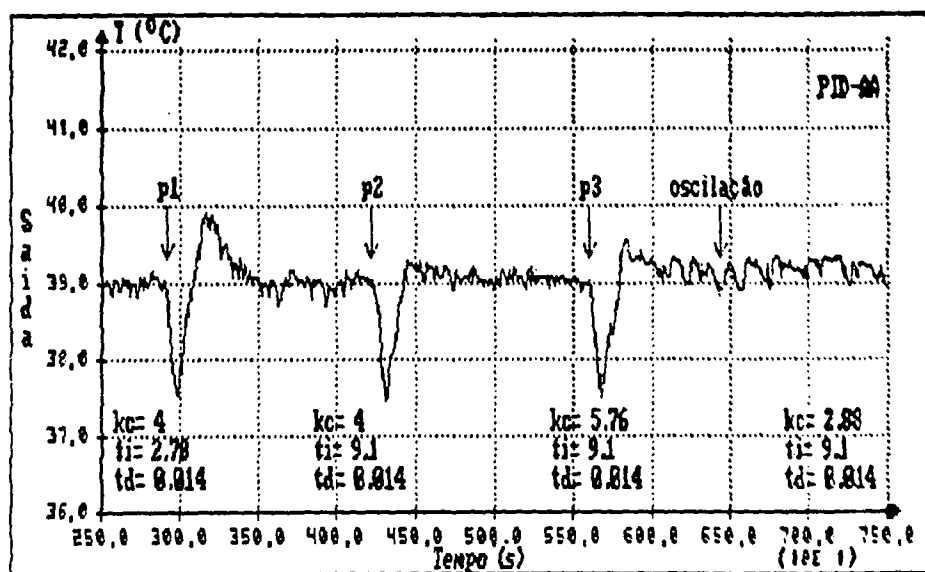


Fig. 6.4 - Comportamento do trocador com PID-AA

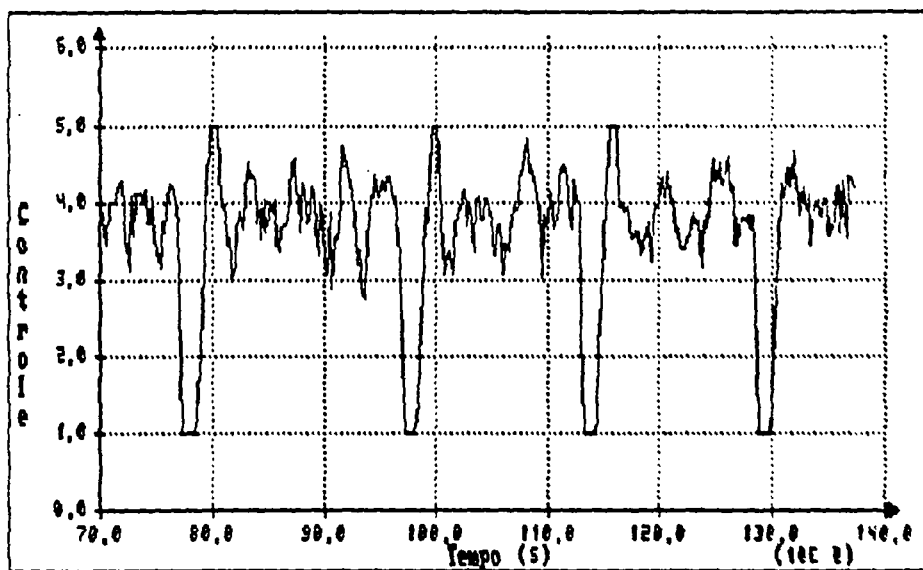
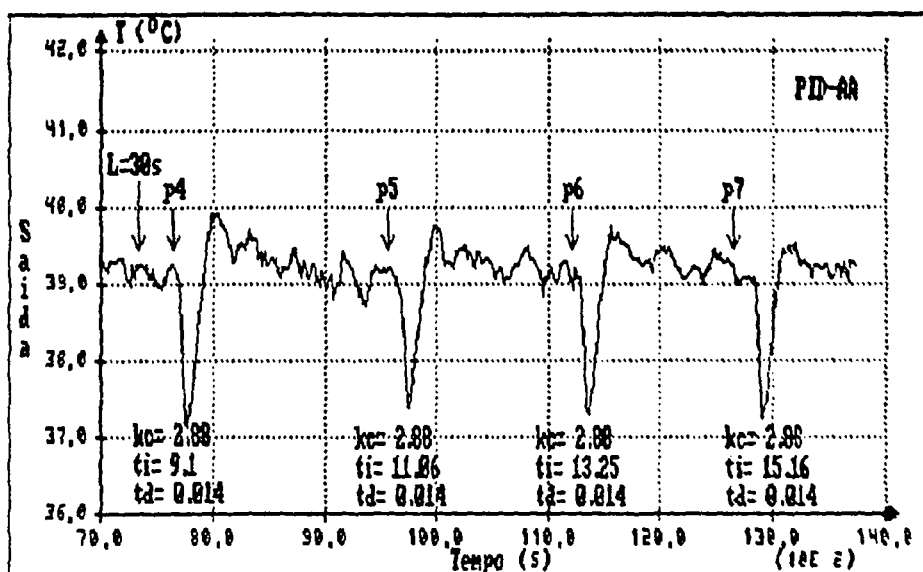


Fig. 6.5 - Comportamento do trocador com PID-AA

A mesma sequência foi repetida utilizando o controlador GPC com os seguintes parâmetros (figura 6.6) :  $N=4$ ,  $n=2$ ,  $m=2$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $\mu=0.5$ ,  $T=10s$  (tempo de amostragem). Como podemos observar, o controlador responde satisfatoriamente à perturbação p1. Após o atraso ser introduzido no processo, o controlador não consegue rejeitar a perturbação (p2) e perde o controle sobre o sistema.

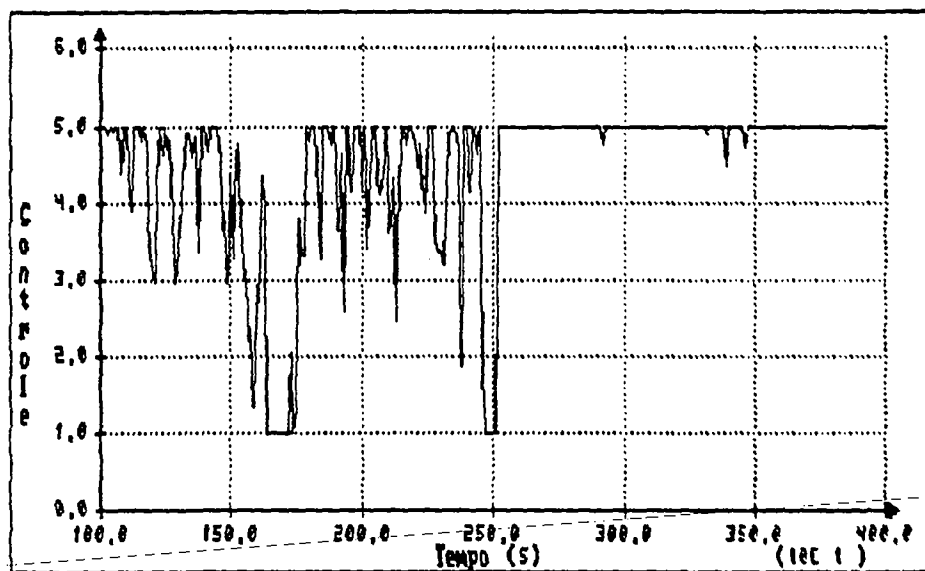
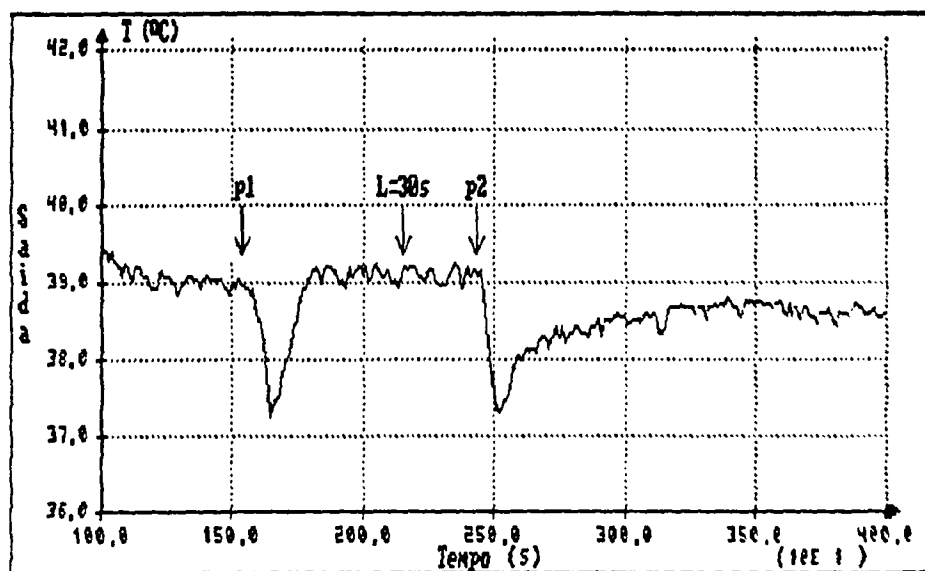


Fig. 6.6 - Comportamento do trocador com GPC

#### 6.4.2. Análise de resultados sobre o sistema de tanques

O comportamento do PID-AA pode ser analisado através das figuras 6.7 e 6.8. Inicialmente foi realizado um pré-ajuste (ensaio de malha aberta) do controlador. Os seguintes parâmetros iniciais foram determinados : para respostas à mudanças de referência obteve-se  $K_{cr}=79.4$ ,  $T_{ir}=110.9s$  e  $T_{dr}=0.13s$ ; para respostas a perturbações obteve-se  $K_{cp}=112.6$ ,  $T_{ip}=56.3s$  e  $T_{dp}=0.22s$ . Em seguida a malha de controle foi fechada e em  $t=210s$  mudou-se a referência de 0.8m para 1.0m.

O PID-AA com os parâmetros iniciais ficou ajustado (resposta especificada: sobrepasso máximo =20% e subpasso máximo = 10%). A seguir foram provocadas duas perturbações de carga que foram rejeitadas. Em  $t=680s$  a dinâmica da planta foi mudada de 1a ordem para 2a ordem, registrando-se uma perturbação paramétrica do sistema. Quatro mudanças de "set-point" (1.0m, 1.20m, 1.30m, 1.10m) e uma perturbação de carga foram realizadas até o PID-AA ficar novamente ajustado. Em  $t=2300s$  a dinâmica da planta foi mudada de 2a ordem para 1a ordem. Nas sucessivas mudanças de referência e perturbações de carga o PID-AA se auto-ajustou novamente à especificação.

A seqüência anterior foi repetida com o controlador GPC (figura 6.9). Os parâmetros de projeto foram  $N=6$ ,  $n=2$ ,  $m=2$ ,  $\mu=0.004$ ,  $\lambda=0.3$ ,  $T=1s$ . Nos primeiros 120s o controlador ficou estimando parâmetros do processo (inicialização), sendo em seguida ativado. Em  $t=480s$  foi provocada uma forte perturbação de carga sendo rejeitada pelo sistema. Em  $t=960s$  a dinâmica da planta foi mudada de 1a ordem para 2a ordem, registrando-se uma perturbação paramétrica. Observou-se que o controlador não conseguiu rejeitar a perturbação. O sistema tornou-se instável devido ao fato do GPC trabalhar com um modelo subestimado da planta (neste caso 1a ordem).

Para verificar o funcionamento correto do GPC, o modelo da planta foi sobreestimado e o controlador foi reinicializado com os seguintes parâmetros ( $N=10$ ,  $n=3$ ,  $m=2$ ,  $\mu=0.001$ ,  $\lambda=0.01$ ,  $T=3s$ ). A figura 6.10 mostra os resultados obtidos sobre o processo de 2a ordem, sendo que em  $t=1680s$  a dinâmica da planta foi mudada novamente para 1a ordem. Observa-se que o controlador responde bem à mudança paramétrica introduzida. Desta forma, verifica-se que o GPC é robusto quando projetado com um modelo sobreestimado ( $n=3$  e  $m=2$ ) da planta.

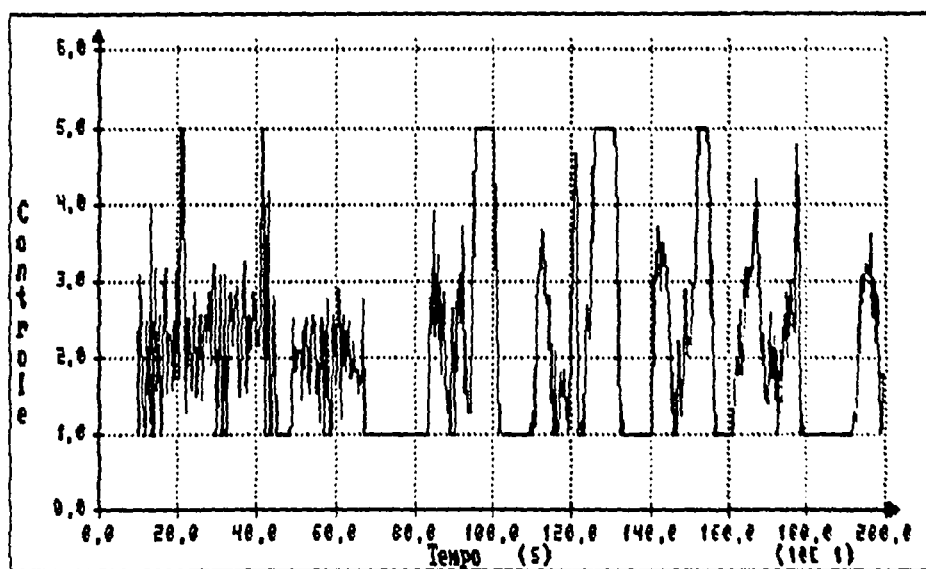
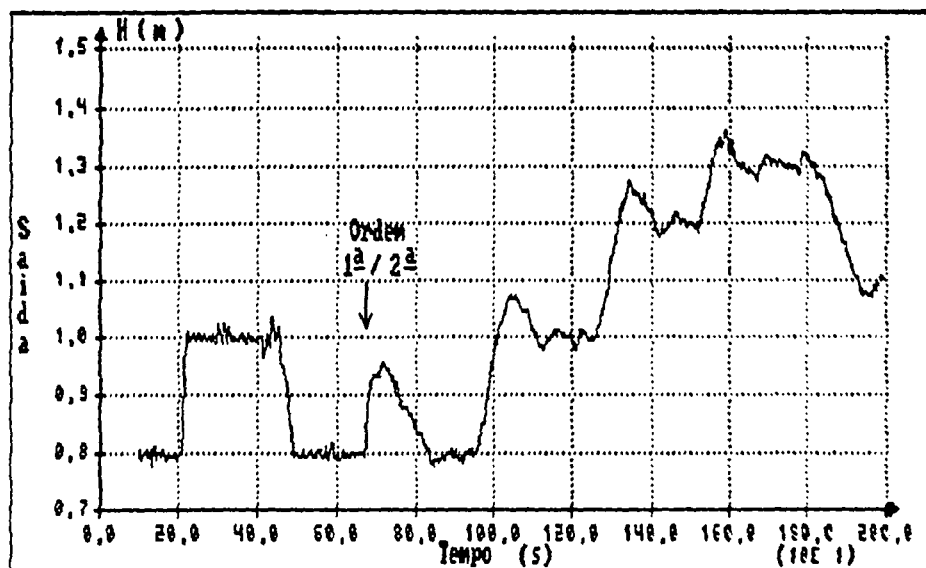


Fig. 6.7 - Comportamento do sistema de tanques com PID-AA

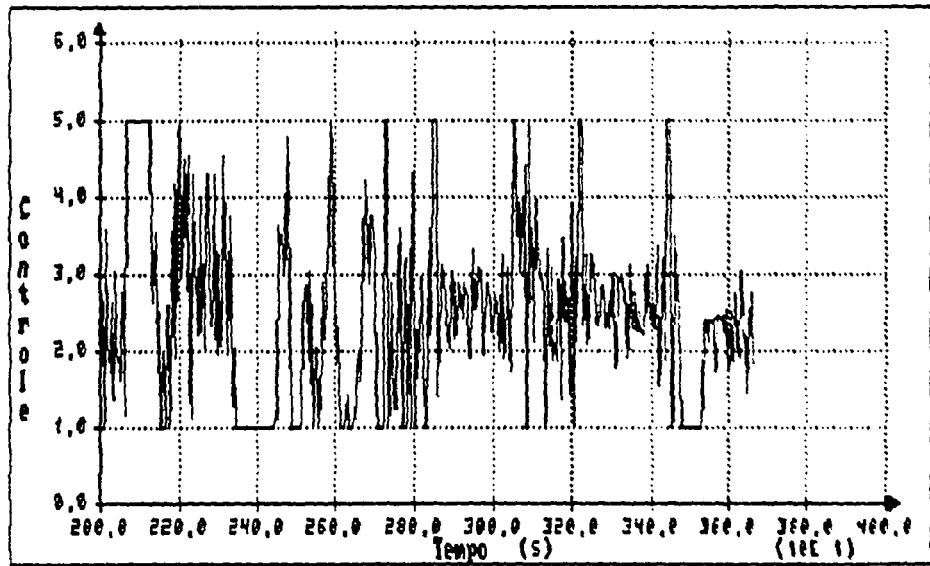
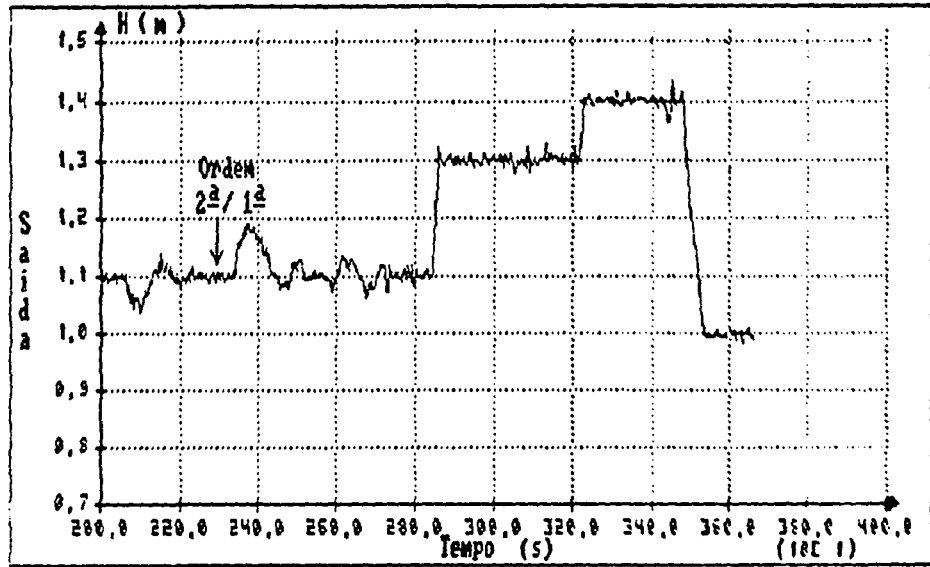


Fig. 6.8 - Comportamento do sistema de tanques com PID-AA (continuação)

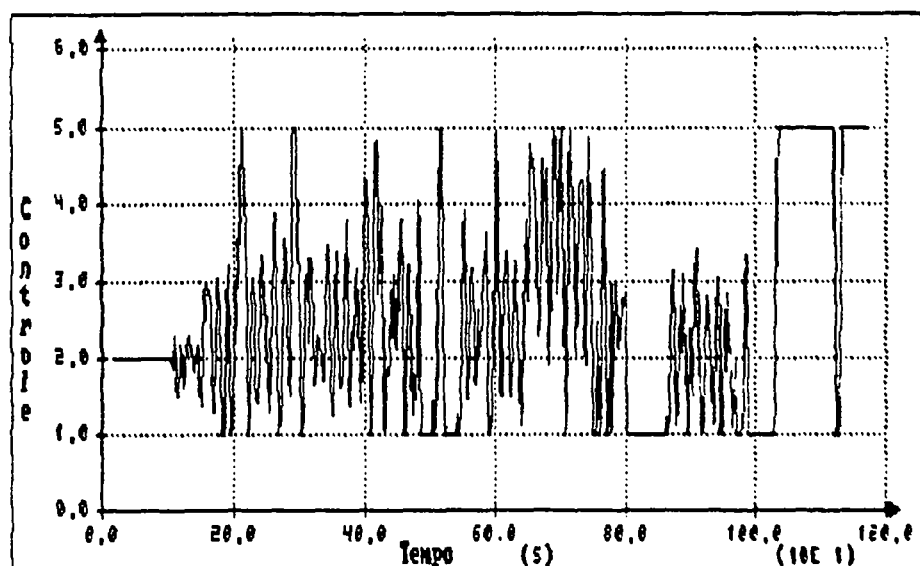
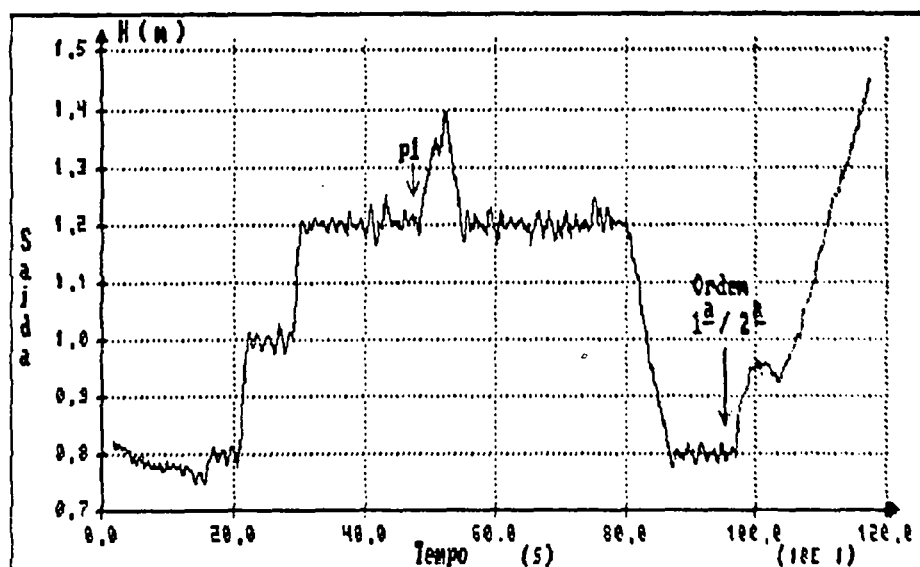


Fig. 6.9 - Comportamento do sistema de tanques com GPC (modelo subestimado)

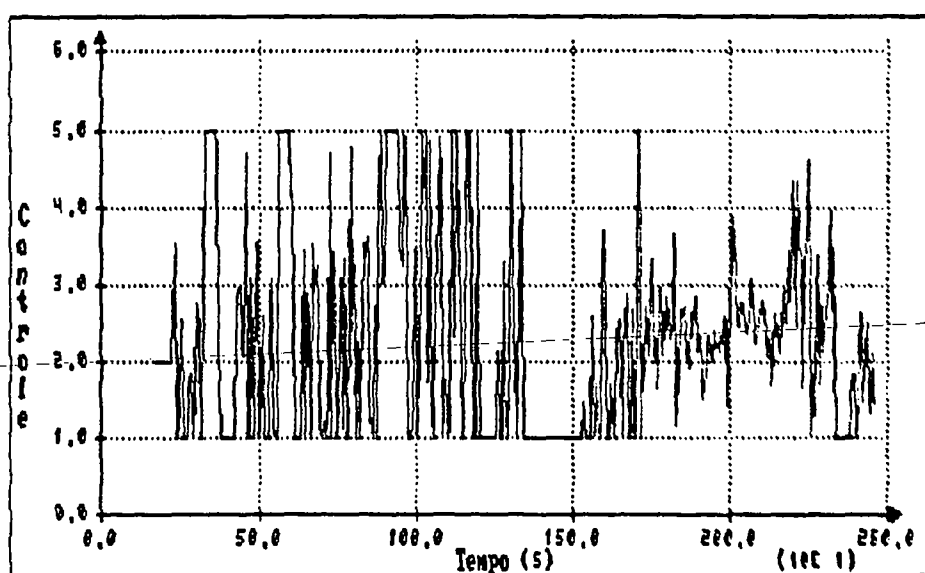
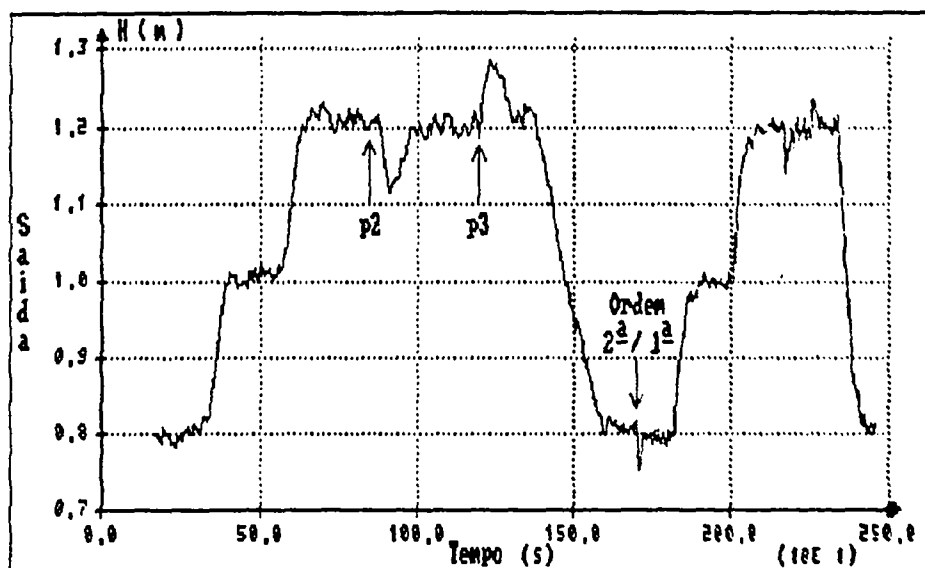


Fig. 6.10 - Comportamento do sistema de tanques com GPC (modelo sobreestimado)



## 6.5. Conclusões

O estudo realizado com os dois controladores foi apenas qualitativo. Um estudo quantitativo necessita da definição de critérios de avaliação de desempenho e uma sistemática bem elaborada, o que não foi o objetivo deste trabalho. Desta maneira os controladores foram comparados sob três aspectos de funcionamento:

### A) Inicialização ("set-up") do controlador

Para inicializar o GPC necessita-se ter um conhecimento avançado da teoria de controle para escolher adequadamente os parâmetros de projeto do controlador (horizonte de predição  $N$ , ponderação da ação de controle, fator que define a trajetória de referência) [McIntosh 91]. A escolha do tempo de amostragem é também importante para maximizar o desempenho do controlador.

Para inicializar o PID-AA basta realizar um ensaio de malha aberta para obter a curva de reação do processo. Para isto dois parâmetros devem ser definidos corretamente: o valor do degrau  $\Delta U$  a ser aplicado de forma que provoque uma variação na saída e o tempo máximo ( $T_{max}$ ) de reconhecimento da curva.

### B) Conhecimento "a priori" da planta

No caso do GPC, é necessário conhecer a ordem do processo. O funcionamento do GPC não é satisfatório (podendo tornar o sistema instável) caso a ordem do modelo da planta seja sub-estimada. É preferível sobreestimar a ordem do modelo para que o algoritmo consiga adaptar-se corretamente. Entretanto a sobreestimação da ordem do processo implica um aumento da carga computacional.

No caso do PID-AA não é necessário conhecer informações sobre o modelo matemático da planta, basta realizar um ensaio de malha aberta.

### C) Características gerais de operação

O GPC é fundamentalmente um algoritmo matemático que apresenta as seguintes características:

- \* adapta-se estimando, a cada tempo de amostragem, os parâmetros da planta, portanto é extremamente útil para processos que variam continuamente a sua dinâmica (ex. reatores semi-batelada, fermentadores, etc);

- \* quando o modelo do processo é sobreestimado o algoritmo mostra-se bastante robusto frente a variações na dinâmica da planta.
- \* uma vez projetado (escolha de seus parâmetros) não permite introduzir novas informações sobre a planta. Utiliza sempre e apenas as informações necessárias para o funcionamento do algoritmo (fixo). Resolve novas situações da planta sempre da mesma maneira;
- \* não permite que pessoal não especializado contribua para a melhoria do desempenho do controlador. Deste ponto de vista é um sistema fechado;

O PID-AA é um controlador adaptativo baseado em conhecimento (regras) e suas principais características são:

- \* o sistema de regras representa o conhecimento do operador de forma automática (ciclo de reconhecimento e ajuste), onde diversas "situações" são previstas;

- \* permite que o algoritmo se adapte à planta, a cada ciclo de reconhecimento da resposta ativado por mudanças de "set-point" ou perturbações de carga, o que o torna menos indicado para processos cuja dinâmica varia a cada instante de amostragem;

- \* é muito mais simples de operar dado que só é necessário definir corretamente os parâmetros FR e Tmax e definir as especificações de controle sobre a resposta (sobrepasso máximo e subpasso máximo);

- \* o reconhecimento das formas de onda das respostas (malha aberta e malha fechada) é um fator crítico no PID-AA. Um erro de reconhecimento ocasiona um ajuste indevido dos ganhos do controlador. Para diminuir esta possibilidade os parâmetros FR e Tmax devem ser devidamente escolhidos pelo operador de planta;

- \* permite que os operadores ou engenheiros de planta contribuam para melhorar o desempenho do controlador através da adição de novas regras. É um sistema aberto com uma base de regras muito flexível;

---

- \* o tempo de desenvolvimento pode ser muito grande caso não se trabalhe com ferramentas automáticas de software, devido ao fato de que a adição de novo conhecimento implica uma nova fase de validação e testes;

- \* o funcionamento do PID está condicionado a frequência de ocorrência das excitações (mudanças de referência ou perturbações de carga). Frequências altas comprometem o funcionamento da resposta devido a superposição de sinais. Por outro lado, frequências muito baixas tornam lentos os ajustes do controlador.

A aplicação destes controladores deve ser realizada considerando-se suas características apresentadas acima. Outros estudos devem ser realizados considerando-se aspectos de desempenho. Desta maneira o presente trabalho tem por principal objetivo servir como uma orientação inicial sobre o tipo de controlador que pode ser utilizado numa dada aplicação. Procurou-se enfatizar os aspectos decorrentes do tipo de abordagem escolhida.

O ajuste inicial do controlador tipo GPC não é uma atividade muito simples. Entretanto a experiência adquirida durante os trabalhos realizados sugere que é possível estabelecer-se uma sistemática de ajuste dos parâmetros deste controlador. Uma possibilidade é a utilização de sistemas especialistas na implementação de um sistema de ajuste dos parâmetros do GPC.

A primeira etapa é descobrir a ordem do modelo da planta, o que pode ser realizado por um sistema de regras como sugere o artigo publicado por Wang [Wang 91]. Uma vez definida a ordem do modelo, a segunda etapa consiste no ajuste dos demais parâmetros de funcionamento do controlador. Desta maneira, a maior deficiência do controlador GPC, que é a necessidade do conhecimento "a priori" de diferentes parâmetros de projeto, pode ser contornada.

## Capítulo VII

### Conclusões e perspectivas

As técnicas de controle adaptativo apresentam-se como uma alternativa interessante no controle de processos industriais, onde modificações nas condições de operação refletem na performance dos controladores presentes na planta. Desta forma alguns controladores industriais já apresentam mecanismos de adaptação, de modo a ajustar dinamicamente seus parâmetros, a medida que modificações na dinâmica da planta ocorrem.

Neste trabalho apresentou-se a implementação do controlador PID-AutoAjustável, que utiliza um sistema especialista de ajuste dos parâmetros Proporcional, Integral e Derivativo, baseado no reconhecimento das formas de onda da resposta do sistema.

O reconhecimento das formas de onda assume importante papel no funcionamento do PID-AA. Por esta razão boa parte do trabalho realizado concentrou-se no desenvolvimento de uma técnica de reconhecimento adequada para a implementação do controlador. Como resultado da pesquisa realizada, foi desenvolvido o método de suavização apresentado.

A arquitetura do sistema implementado foi projetada de modo a adicionar a um controlador do tipo PID, as características de um controlador adaptativo. Assim a estrutura básica do controlador foi preservada, sendo a esta adicionados outros módulos que implementam os mecanismos adaptativos. Desta maneira, pode-se adicionar, mediante pequenas modificações, as características do controlador PID-AA em controladores digitais que permitam a programação de seus parâmetros.

Dois tipos de mecanismos caracterizam o funcionamento do controlador PID-AA: mecanismo de ajuste automático e mecanismo de auto-ajuste. O primeiro permite que os parâmetros iniciais do controlador sejam determinados automaticamente. O segundo permite que o controlador constantemente atualize seus parâmetros de operação, a fim de operar com um conjunto de parâmetros "ótimo".

A comparação realizada entre um controlador PID clássico e o PID-AA, mostrou nitidamente a vantagem do controlador desenvolvido. Além da capacidade de auto-ajustar seus parâmetros até atingir os parâmetros ótimos de ajuste e

sempre adaptar-se conforme ocorrem mudanças no processo, o PID-AA incorpora um mecanismo de ajuste automático de seus parâmetros iniciais.

A etapa seguinte a ser realizada deverá constituir-se na implementação de um primeiro protótipo a nível industrial, com o objetivo de testar e validar o controlador sob condições exatamente iguais às encontradas no meio industrial. Além disto, uma avaliação comercial da viabilidade econômica de fabricação deste controlador é igualmente importante. Neste sentido, os seguintes tópicos podem ser desenvolvidos :

- análise da natureza e do espectro do ruído em ambiente industrial
- tornar mais robustas as rotinas de tratamento do ruído
- estudo do sistema de regras desenvolvido, a fim de otimizar o conjunto de regras existentes ou limitar o conjunto de regras para aplicações específicas
- verificação da possibilidade de o sistema definitivo utilizar um sistema de regras implementado de forma seqüencial
- estudo da natureza das perturbações em meio industrial
- utilização de um núcleo de tempo real para implementação do PID-AA desenvolvido
- estudo da utilização de redes neurais no reconhecimento de padrões de formas de onda
- implementação de um protótipo industrial

A utilização de um sistema de regras de produção facilitou o desenvolvimento do sistema especialista de ajuste dos parâmetros do controlador, pela facilidade com que as regras podem ser representadas. Entretanto verificou-se que o sistema final apresentou um comportamento sensivelmente seqüencial. Portanto, o sistema especialista pode, na verdade, ser implementado de forma seqüencial através de um linguagem procedural, ao contrário da hipótese inicialmente estabelecida.

O controlador do tipo GPC representa uma outra abordagem adaptativa, mas seu maior inconveniente é a dificuldade de determinar corretamente seus parâmetros ótimos de funcionamento. Contudo o conhecimento e o estudo realizado no desenvolvimento do PID-AA, sugerem ser possível o desenvolvimento de um sistema especialista de ajuste também para o controlador GPC.

A utilização de um simulador em estações de trabalho, possibilitará o aperfeiçoamento do sistema de regras [Kammer 92]. O principal objetivo deverá ser diminuir o número de regras realmente necessárias para realizar-se o ajuste dos parâmetros do controlador. Desta maneira o tamanho da memória necessária para o sistema operar e a velocidade de cálculo do ajuste poderão ser melhorados.

Finalmente, espera-se que este trabalho contribua positivamente para o desenvolvimento de melhores controladores industriais e que outros trabalhos de caráter tecnológico sejam realizados.

**"Probieren geht über estudiren"**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Abreu 92)

Abreu,A.H., Bolzan,A. e Pagano,D.J. - "Un estudio comparativo de dos controladores adaptativos de procesos industriales". 9º Congresso LatinoAmericano de Automática. Cuba 1991.

(Åström 73)

Åström, K.J. and Wittenmark,B. - "On self-tuning regulators". Automatica, Vol.9 : 185-199; 1973.

(Åström 84)

Åström, K.J. and Wittenmark,B. - "Computer controlled systems - theory and design". Prentice-Hall. Page 268. 1984

(Apolônio 88)

Apolônio, R. - "Uma proposta de controlador PID auto-ajustável para uso industrial". Dissertação de mestrado, EEL-UFSC; 1988.

(Bennet 88)

Bennet, S. - " Real Time Computer Control : an introduction." Prentice Hall International. 1988.

(Bolzan 91)

Bolzan A. - "Controle adaptativo para reatores químicos que operam em batelada". Tese de doutorado, COPPE-UFRJ; 1991.

(Bristol 77)

Bristol E. - "Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptative control". Automatica, Vol.13: 197-202; 1977.

(Brownston 86)

Brownston, L. et alli - "Programming Expert Systems in OPS 5 - an introduction to rule based programming". Addison-Wesley Publishing Company. 1986.

(Bruciapaglia 86)

Bruciapaglia,A. e Apolônio,R. - "Uma estratégia de eliminação da sobrecarga da ação integral para controladores PID discretos: aplicação no controle de velocidade de um motor de corrente contínua". II Congresso LatinoAmericano de Automática, Buenos Aires - Argentina; 1986.

(Caetano 92)

Caetano,S.S. - "Controlador PID-AA : novos desenvolvimentos". Dissertação de mestrado, EEL-UFSC; 1992.

**(Clarke 79)**

Clarke, D.W. and Gawthrop, P.J. - "Self-tuning control". Proc IEE no.126:633-640; 1979.

**(Clarke 87)**

Clarke, D.W.; Mohtadi, C. and Tuffs, P.S. - "Generalized Predictive Control - Part I : the basic algorithm". Automatica Vol.23, no 2: 137-148; 1987.

**(CLIPS)**

CLIPS - "C language integrated production systems". COSMIC, the University of Georgia 382 East Broad Street Athens, GA 30602.EUA.

**(Draper 66)**

Draper, N.R. and Smith, H. - "Applied Regression Analysis" John Wiley & Sons, Inc. 1966.

**(Hang 91)**

Hang, C.C. and Sin, K.K. - "A comparative performance study of PID auto-tuners". IEEE Control Systems, August 1991.

**(Kalman 58)**

Kalman, R.E. - "Design of a self optimizing control system". Transactions of ASME 80, series D : 468 ; 1958.

**(Kammer 92)**

Kammer, L.; Pagano, D.J. e Bruciapaglia, A.H. - "Avaliação de desempenho de controladores adaptativos: um ambiente de simulação". 9<sup>o</sup> CBA, setembro 1992.

**(Marquardt 63)**

Marquardt, D.W. - "An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters", J. Soc. Ind. Appl. Math, v.2:431-441.

**(McIntosh 91)**

McIntosh, A.R.; Shah, S.L. and Fisher, D.G. - "Analysis and Tuning of adaptive generalized predictive control". The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.69:97-110; 1991.

**(Mettrey 91)**

Mettrey, W. - "A comparative evaluation of Expert Systems Tools". IEEE Computer Society, Computer Vol.24, Feb 1991.

**(Morris 87)**

Morris, H.M. - "How adaptive are adaptive process controllers?". Control Engineering pp 96-100; March 1987.



(Pagano 88)

Pagano, D.J., Bruciapaglia, A.H. e Garnousset, H.E. - "Sistema Especialista para ajuste de controladores PID". Anais do III Congresso LatinoAmericano de Automática, Vinã del Mar, Chile. Paginas 88-95, 1988.

(Pagano 89)

Pagano, D.J. - "Desenvolvimento de um controlador digital PID auto-ajustável baseado num sistema especialista". Dissertação de mestrado, EEL-UFSC; 1989.

(Paladino 91)

Paladino, A.D.A. - "Um gerador de programas para sistemas de regras de produção visando à eficiência na execução". Dissertação de mestrado, EEL-UFSC; 1991.

(Seborg 86)

Seborg, D.E.; Edgar, T.F. and Shad, S.L. - "Adaptive control strategies for process control: a survey". AIChE Journal, Vol.32, no 6:881-913. 1986.

(Shinskey 79)

Shinskey, F.G. - "Process control systems". New York, second Edition, McGraw-Hill, pp 96-99. 1979.

(Sinha 83)

Sinha, N.K. and Kuszta, B. - "Modeling and Identification of Dynamic Systems". Van Nostrand Reinhold Company, 1983.

(Smith 59)

Smith, O.J.M. - "A controller to overcome dead time". Instrument Society of America Journal, Vol.6, no 2:28-33; 1959.

(Silva 88)

Silva, E.S. - "Uma linguagem de programação de componentes elementares para aplicações distribuídas em tempo real". Dissertação de mestrado, EEL-UFSC; 1988.

(Wang 91)

Wang, H. and Jones, A.H. - "Rule based identifier for unknown systems". IEE Proceedings, D, Vol.138, no 5; Sep 1991.

(Wellstead 86)

Wellstead, P.R. - "Introduction to self-tuning systems". Apostila do curso. Control Systems Centre. UMIST. November 1986.

(Versteeg 86)

Versteeg, H.J.; Jansma, H.J. and Turner, K. - "Evaluation of commercially available adaptive controllers". Journal A., Vol.27 no 3; 1986.

(Ziegler 42)

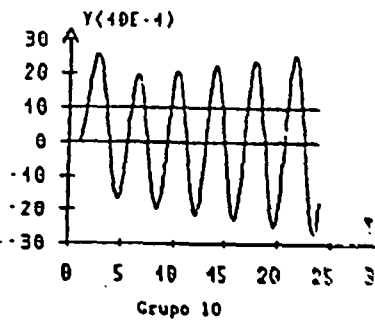
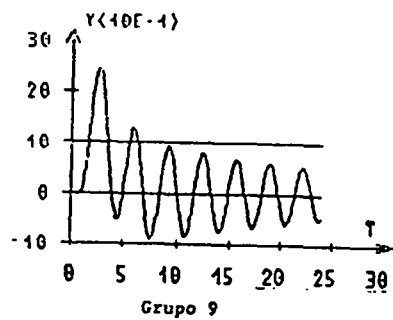
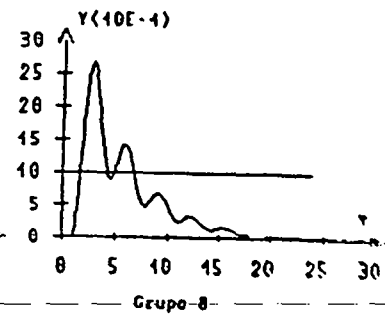
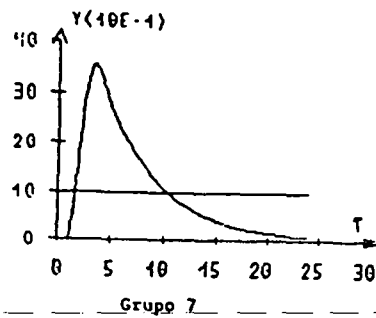
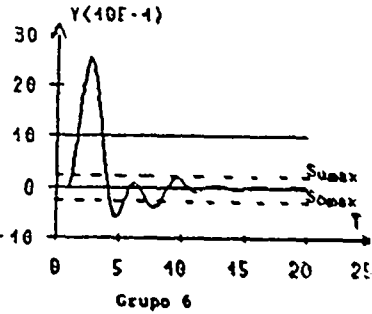
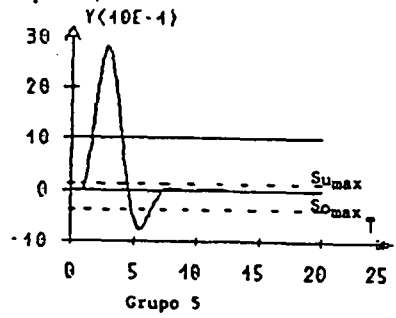
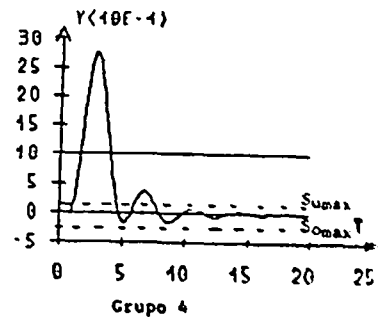
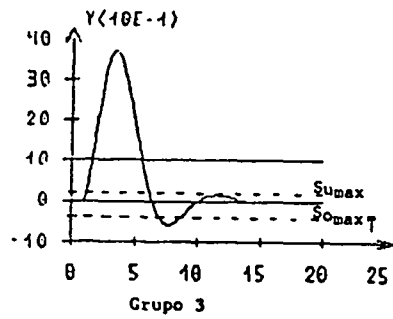
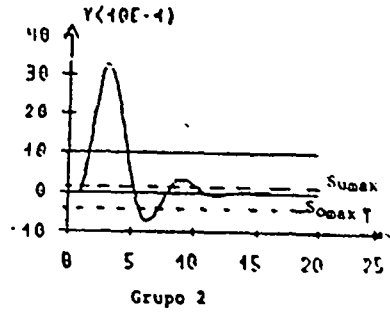
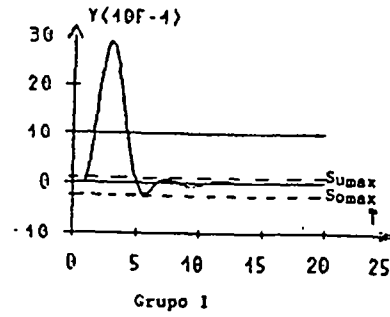
Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. - "Optimum settings for automatic Controllers". Transactions of the ASME, Vol.64:759-768; Nov 1942.

(Ziegler 43)

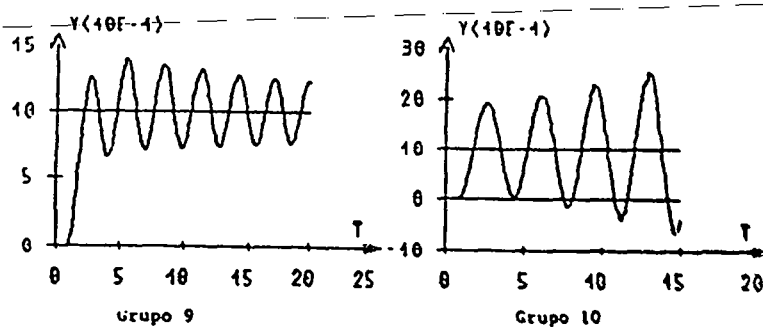
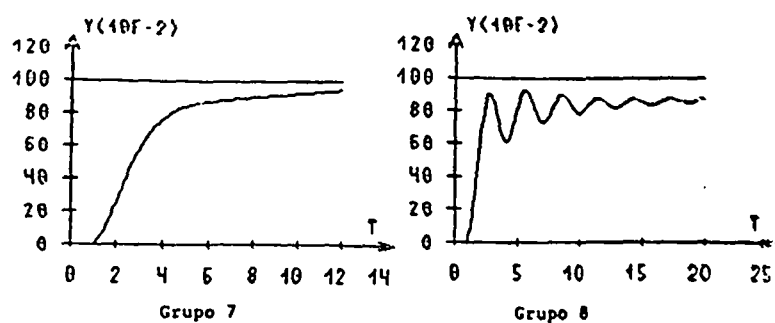
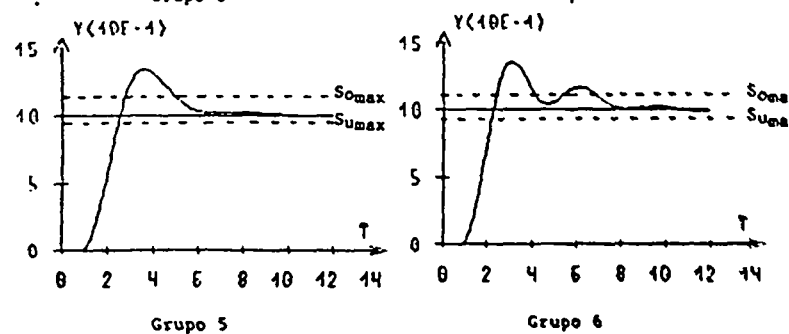
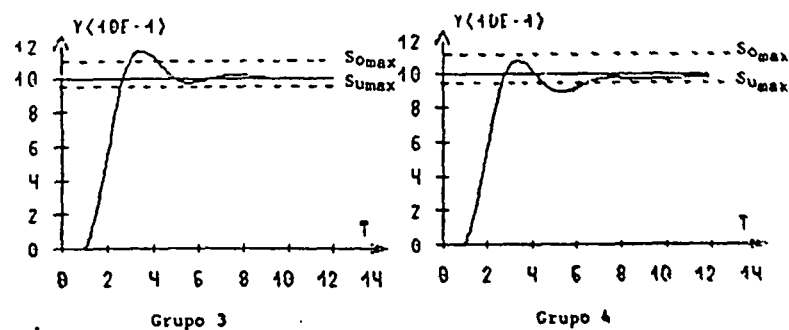
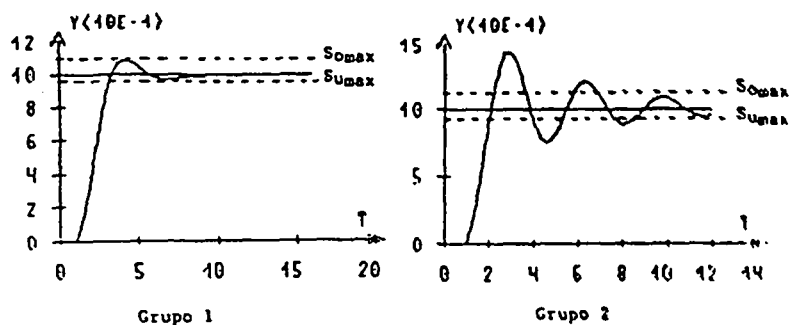
Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. - " Process lags in automatic control circuits". Transactions of ASME, 433-444; July 1943.

# Apêndice A

## Padrões de formas de onda para respostas a referência

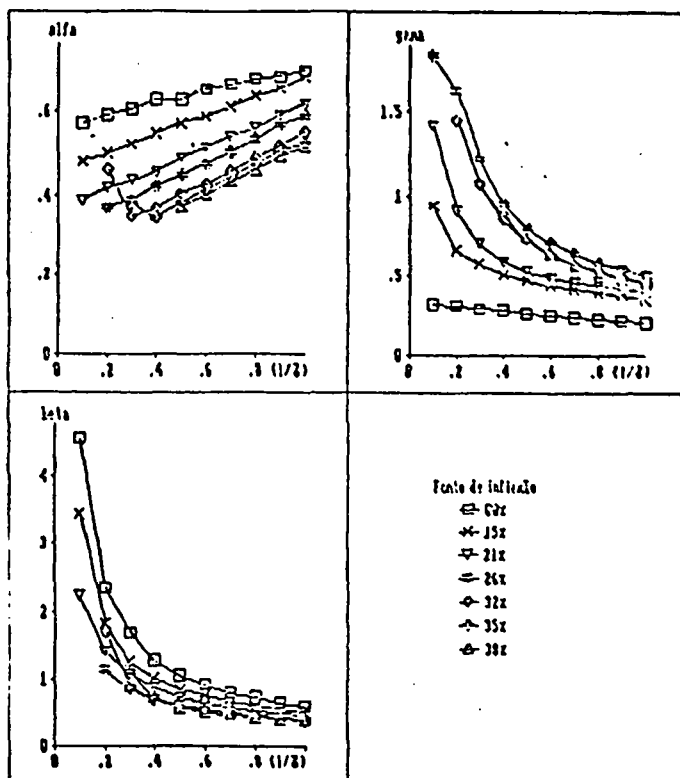


# Padrões de formas de onda para respostas a perturbações

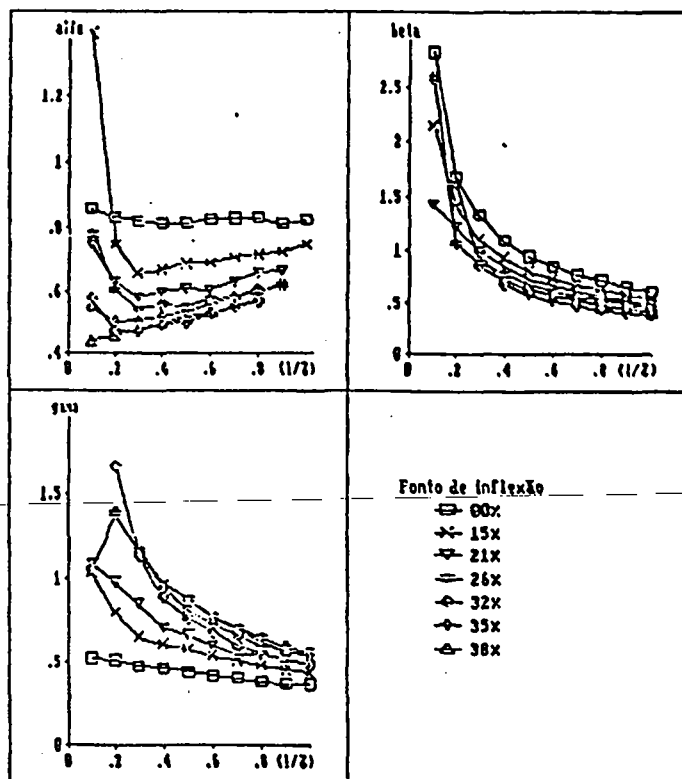


### Apêndice B

Curvas empíricas da relação entre alfa, beta e gama com a relação  $L/\zeta$



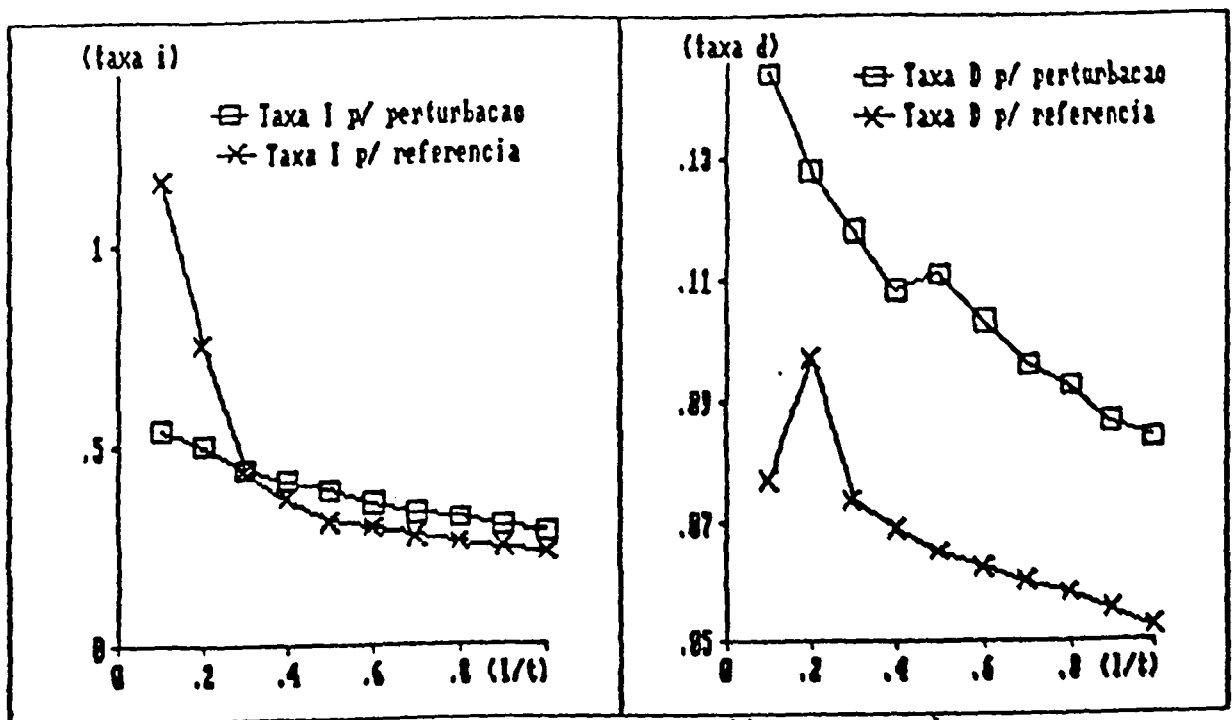
### Caso do Servomecanismo



### Caso do Regulador

## Apêndice C

Curvas empíricas da relação entre taxa integrativa e taxa derivativa do controlador com a relação  $L/\tau$



## Apêndice D

### Determinação automática da Faixa de Ruído (FR)

O valor da faixa de ruído resulta do ruído presente no sinal medido e da própria resolução dos conversores utilizados. Este reconhecimento é realizado a pedido do operador de planta quando o controlador está em funcionamento automático e sempre que ocorre a inicialização do controlador durante o ajuste automático (ajuste inicial dos parâmetros do controlador).

Para o reconhecimento correto da faixa de ruído, o sistema deve estar em regime permanente. Durante todo o reconhecimento o valor de referência ("set-point") é mantido constante. O reconhecimento é dividido em quatro etapas:

#### A) Determinação do valor de regime de saída:

O sinal de saída é monitorado durante o TRECS (Tempo de REConhecimento de Saída) que corresponde a um número fixo de amostras. Portanto, o valor do TRECS depende do período de amostragem. O valor de regime é o valor médio das amostras obtidas. Seja  $Y_{reg}$  o valor de regime da saída, então:

$$Y_{reg} = \frac{\sum_{i=0}^N y_i}{N}$$

onde:  $Y_i$  valor da saída no  $i$ -ésimo instante de amostragem  
 $N$  número total de amostras

#### B) Determinação dos máximos e mínimos médios da resposta:

A determinação dos valores de máximo e mínimo é realizada durante o TRECR (Tempo de REConhecimento do Ruído), que é função do período de amostragem e é dividido em intervalos menores. Para cada um destes intervalos são determinados dois valores médios: um valor médio correspondente a pontos de máximo e outro correspondente a pontos de mínimo. Definimos pontos de máximo aqueles pontos que possuem valor maior que o valor de regime ( $Y_{reg}$ ). Pontos de mínimo são aqueles que possuem valor abaixo do valor de regime ( $Y_{reg}$ ).

#### C) Validação dos valores máximos e mínimos médios :

Embora durante este procedimento de reconhecimento o valor da referência mantenha-se constante, existe ainda a possibilidade da ocorrência de perturbações de carga interferirem na determinação da Faixa de Ruído. Para contornar este problema os valores máximos e mínimos médios são comparados com o valor médio das médias de máximo e o valor médio das médias de mínimo de cada intervalo. Obtemos assim duas novas médias : uma média para os valores máximos médios e outra para os valores mínimos médios. Todos os valores dos máximos médios que estão acima do dobro do valor da média dos máximos e todos os valores mínimos médios que estão abaixo do dobro do valor da média dos mínimos são descartados.

Desta forma possíveis efeitos de perturbações na saída são evitados no cálculo da Faixa de Ruído.

**D) Cálculo do valor da Faixa de Ruído:**

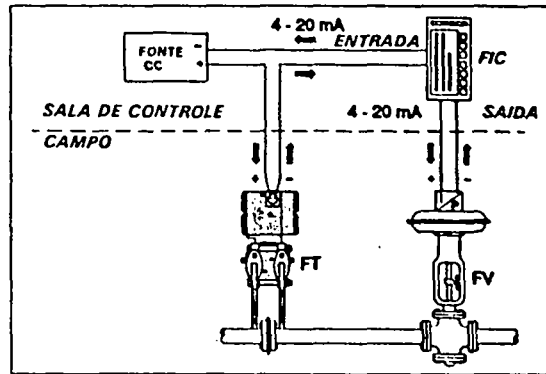
Os valores máximos médios e mínimos médios restantes que não foram descartados após a validação são utilizados para calcular novos valores médios. Assim calculamos uma nova média dos máximos médios e uma nova média dos mínimos médios. O valor da Faixa de Ruído é a soma dos módulos destes dois novos valores médios.



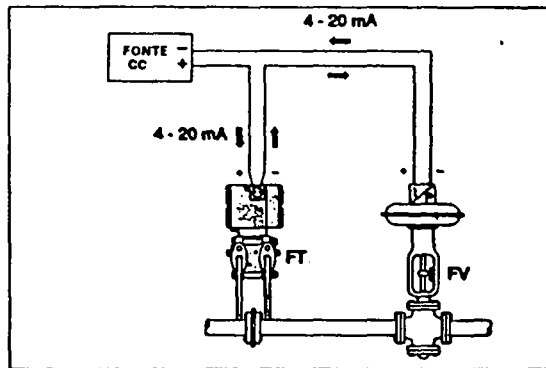
## Apêndice E

### Exemplo de aplicação de sensores inteligentes

Operando como Transmissor Convencional



Operando como Controlador Local



Operando como Controlador com Supervisão à partir da Sala de Controle

